Jean-Claude Taymans

Le NITROX

Gaz Mixing and Blending

Pratique de la plongée NITROX

Préparation du matériel , fabrication des gaz, NITROX, HELIOX, HELIAIR, TRIMIX, remplissage des bouteilles

JCT Consulting – Moby Dick Diving School

L'auteur exprime ses plus vifs remerciements à **Pol Delhaye**, à **Freddy Noris** pour le travail de vérification ainsi qu'a **Henk Hanson** du Grevelingen Duikstation (Zélande)

Préambule

Le but de cet ouvrage n'est pas de remplacer une formation adéquate dispensée par des instructeurs qualifiés mais de donner aux plongeurs, Divemasters et instructeurs des bases pour apprendre à gérer leurs plongées NITROX, la fabrication de leurs mélanges et le remplissage des bouteilles.

Niveaux :

- Spécialisation plongeur NITROX.
- Spécialisation « Gaz Mixing and Blending »
- Divemasters
- Instructeurs

Chapitres et paragraphes plus particulièrement destinés aux instructeurs.

Indique un mode opératoire.

Indique des points à lire avec une attention toute particulière.

L'auteur décline toute responsabilité pouvant provenir d'une éventuelle erreur ou d'un usage erroné des données de cet ouvrage.

Toute reproduction d'un extrait quelconque de cet ouvrage, par quelque procédé que ce soit, notamment par imprimerie, photocopie, microfilm …est strictement interdite sans l'autorisation de l'auteur. Toute reproduction faite sans le consentement de l'auteur constituerait une contrefaçon sanctionnée par le code pénal .
Tous droits de traduction, d'adaptation, et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.

Copyright © Jean-Claude Taymans - Tous droits réservés
Rue Mouzin 2 - 7390 Wasmuël
D/Mai 2004/ Jean-Claude Taymans: Editeur

Table des matières

La Théorie 4

Avant-propos 4

Historique 4

Qu'est ce le NITROX ? 4

Avantages du NITROX 4

Inconvénients du NITROX 5

Quelques rappels de physique élémentaire 5

Equivalent Air Depth (EAD) 6

L'oxygène 6

L'effet Paul Bert 6

Exposition Maximum à l'O_2 et le CNS(D'après le NOAA) 7

L'effet Lorrain - Smith 10

Planification et Gestion de la plongée 11

Avant-propos 11

L'avant plongée 11

La plongée 11

L' après plongée 12

Gestion de la plongée 12

Matériel et préparation du matériel 16

Règles générales édictées par le NOAA 16

Bouteille 16

Detendeur 16

Manomètre 17

Gilet de stabilisation 17

Costumes secs 17

Préparation du matériel 17

Compresseurs et centres de gonflage 20

Composition de l'air sec 20

L'air respirable. 20

Le compresseur 21

Le moteur d'entraînement 22

Le filtre d'aspiration 22

Séparateur huile/eau 22

Filtration finale. 22

Le refroidissement. 22

Les Tampons. 23

La rampe de gonflage. 23

Installation des stations de gonflage. 24

Les compresseurs compacts « Silent » et « Super Silent » 27

Entretien 27

Frais de fonctionnement et d' amortissement 28

Logbook du compresseur 28

Fabrication des gaz Remplissage des bouteilles 29

Avertissement 29

Les méthodes de fabrication du Nitrox. 30

Remplissage à partir d'un mélange préfabriqué 36

Les mélanges ternaires 37

Calcul du TRIMIX méthode des pressions partielles 38

Le marquage des bouteilles 39

Le registre des gonflages 40

Analyse des mélanges 41

Analyseur d'oxygène ou oxymètre 41

Utilisation de l'oxymètre 43

Analyseur d'hélium 43

Appendices & annexes 44

APP- 1 Tableaux de remplissage
APP- 2 Les relations de Van der Waals
APP- 3 Les bonnes adresses
APP- 4 Les exemples
APP- 5 Les tableaux
APP- 6 Bibliographie

ANN- 1 CD-Rom
ANN- 2 Registre gonflage
ANN- 3 Logbook compresseur

Chapitre 1

La Théorie

Niveau :

Spécialité plongeur NITROX
Divemaster
Instructeur
Spécialité Gaz Blending
(***Partie Physique***)

Avant-propos

Le but de cet ouvrage est de préparer les plongeurs qui désirent passer une qualification de "plongeur NITROX[1] dans le cadre de la plongée loisir, c'est à dire des plongées exécutées sans paliers obligatoires. Néanmoins afin d'illustrer certaines particularités du NITROX, et **uniquement dans un but didactique,** certains calculs simuleront des plongées à paliers. Les paragraphes marqués 👁 sont du niveau instructeur.

Historique

- 1773: Découverte de l'O_2 par Carl Scheele
- 1778: Publication des travaux de Paul Bert sur le NITROX
- 1960: Utilisation du NITROX en plongée commerciale
- 1964: Utilisation du NITROX en plongée spéléo
- 1985: Tables et procédures éditées par le NOAA[2] pour le NITROX I & II
- 1991 Richard Rutkowski crée l'IANTD[3] qui est la première association de "plongée loisir" aux mélanges

Qu'est ce le NITROX ?

Le NITROX est par définition de l'air enrichi à l'oxygène. Le NITROX est un mélange Oxygène/Azote (O_2/N_2) qui doit contenir, pour avoir l'appellation NITROX, entre 25 et 80 % d'O_2. Pour des raisons pratique, de sécurité et de prix de revient le plongeur loisir se limite généralement à des mélanges contenant 32 ou 36 % d'O_2 aussi appelés respectivement NITROX I et NITROX II.

Avantages du NITROX

- **Augmentation de la durée de plongée sans décompression** (plongée loisir)
- Réduction du temps de décompression (plongée technique)
- Diminution du taux d'azote résiduel dans l'organisme après la plongée
- Diminution du risque d'accident de décompression
- Diminution du risque de narcose
- Diminution de la fatigue après la plongée

1 NITrogen-OXygen
2 National Oceanographic and Atmospheric Administration
3 International Association of Nitrox and Technical Divers

Inconvénients du NITROX

- Risques liés à la toxicité de l' O_2
- La production de NITROX demande des équipements spéciaux et coûteux
- Le matériel doit être parfaitement dégraissé
- Une utilisation du NITROX sur une longue période peut occasionner des lésions pulmonaires
- L'utilisation du NITROX demande une formation spécifique
- Prix de revient par plongée sensiblement supérieure à la plongée à l'air

Quelques rappels de physique élémentaire

Définitions et unités

Pression (P): Force exercée par unité de surface (Newton par mètre carré ou N/m^2) = 1 pascal
1 bar = 100.000 [4] pascal = ~1 atmosphère = ~10m CE = 1013mbar
P_p= Pression partielle

Température (T) :
T: température absolue exprimée en °Kelvin
t :température relative exprimée en Centigrade

$$T = t + 273,15 \quad (1)$$

Volume (V): Volume occupé par un gaz exprimé en m^3

Loi des gaz parfaits

Boyle, Mariotte, Gay-Lussac, Charles ont démontrés que lors de l'évolution d'un gaz, son volume occupé, sa température et sa pression étaient liés. La loi de transformation d'un gaz qui passe de l'état 1 à l'état 2 peut s'écrire sous la forme de la relation

$$P1 \times V1 / R^{(5)} \times T1 = P2 \times V2 / R \times T2$$
$$P1 \times V1 / T1 = P2 \times V2 / T2 \quad (2)$$

Si la transformation est isotherme température constante) alors: T1=T2=T et la relation ci-dessus devient P1 x V1=P2 x V2 et on retrouve la loi de Boyle-Mariotte.

Loi sur les mélanges des gaz ou Loi de Dalton

La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est la pression qu'aurait ce gaz s'il occupait seul le volume total du mélange. La pression totale du mélange est la somme des pressions partielles.

Corollaire:
La pression partielle d'un gaz constituant d'un mélange est égale au produit de la pression totale par le taux du gaz considéré.

Soit un mélange de n gaz, la loi de Dalton peut s'écrire sous la forme:

$$P=\Sigma_{(1-n)}Pp_n=Pp_1+ Pp_2+ Pp_3+ Pp_n \quad (3)$$

Avec:
$$Pp_1=P \times \%gaz_1 \qquad Pp_2=P \times \%gaz_2$$
$$Pp_n=P \times \%gaz_n \quad (4)$$

P étant la pression absolue et Pp les pressions partielles.

Exemple #1:
Hypothèse
On mesure la pression d'une bouteille de plongée qui est de 199 bar, cette bouteille contient de l'air qui est constitué du mélange des gaz suivants:N2=79% O2=21%

Question:
Quelle est la pression partielle des différents constituants?

Solution:
P=199+1=200 bar
PpN2=200x79/100=158 bar
PpO2=200x21/100=42 bar

Vérification:
P=158+42=200 bar

Exemple #2:
Hypothèse
La Pression partielle d'un gaz respiré à 40m est de 1,5 bar

Question:
Quel est le pourcentage de ce gaz dans le mélange?

Solution: P=40/10 +1 =5 bar
%gaz=1,5/5=0,3 soit 30%

4 En fait, la valeur exacte est 98150 généralement arrondie à 100000 pour faciliter le calcul.
5 R: Constante des gaz parfait

Equivalent Air Depth (EAD)

Le principal facteur dans la détermination de la décompression est la pression partielle de l'azote (Ou encore en toute rigueur de l'ensemble des gaz neutres[6]) dans le NITROX, l'oxygène ne joue lui aucun rôle dans cette détermination. On pourra donc utiliser les tables de plongée à l'air à condition qu'il y ait équivalence des pressions partielles d'azote.
La profondeur équivalente (EAD) est la profondeur qui donne le même profil de décompression qu'une plongée faite à l'air pour la même durée. C'est avec cette profondeur calculée que nous utiliserons les tables. Pr étant la profondeur réelle de plongée, on calcule l' EAD par la formule suivante :

$$EAD = \frac{(1-\%O_2/100)\,(Pr+10)}{0.79} - 10 \quad (5)$$

Pour les plongées faites en altitude les règles établies par le commandant Chauvin restent d'application mais il faut, dans ce cas, remplacer Pr de la formule (5-1) par Pf qui est la profondeur fictive et où Pb est la pression barométrique en bar mesurée à l'altitude considérée.

Pf = Pr x 1.013 [(7)] / Pb (5-1)

Exemple #3:
Question
Calculer l'EAD pour un NITROX 32 à -33m?

Solution:
Pr = 33 $\%O_2$=32 Pr + 10= 33+10=43
(1-$\%O_2$/100)=1-32/100 = 1-0,32 = 0,68
EAD=(0,68 x 43/0,79)-10= 27 m

Ce qui signifie que plonger à -33 m avec un NITROX 32 % correspond du point de vue décompression à une plongée de -27 m à l'air.

L'oxygène

L'oxygène est un gaz paramagnétique, incolore, insipide et inodore indispensable à la vie humaine mais qui n'est toléré par l'homme que dans une plage de pression partielle assez étroite. En dehors de cette plage, des effets cliniques peuvent apparaître sous deux formes : la crise neuro-toxique ou « Effet Paul Bert » et la "pneumonie chimique" ou « Effet Lorrain – Smith »

6 L'air contient d'autres gaz neutres à l'état de trace, ce sont les gaz rares (Argon, hélium…)
7 La pression atmosphérique normale est de 1,013 bars

Tableau #1: Seuil toxique de l'oxygène

PpO_2 (mélanges)	
0,1 bar	Anoxie, inconscience, coma, mort [8]
0,16 bar	Signes d'hypoxie
0,21 bar	Normoxie
0,5 bar	Exposition maximum à saturation
1,4 bars	Exposition maximum conseillée en plongée loisir
1,6 bars	Exposition maximum en plongée loisir (Exposition maximum légale en plongée d'incursion)
2,8 bars	Utilisation thérapeutique

L'effet Paul Bert

Il s'agit d'une intoxication due à la respiration d'O_2 à des pressions partielles élevées qui peut se traduire par une crise hyperoxique. L'O_2 s'attaque au système nerveux central ou "Central Nervous System" (CNS) provoquant des crises de convulsions ressemblant à des crises d'épilepsie. Ces crises sont dues au dysfonctionnement du métabolisme cellulaire provoqué par la production de produits oxydants (superoxydes, peroxydes, radicaux O^+) qui nuisent à certains enzymes au niveau de la cellule. Cet effet néfaste de l'O_2 a été mis pour la première fois en évidence par le physiologiste Paul Bert en 1778. Les recherches récentes effectuées par le NOAA ont permis d'établir des règles permettant de déterminer le temps de latence avant l'apparition des symptômes hyperoxiques. L'organisme possède des moyens de défense naturel contre la production d'oxydant ce qui explique que tous les plongeurs ne sont pas égaux devant la crise hyperoxique.

Défenses naturelles contre les oxydants

- Vitamines E présentes dans l'organisme
- Réduction de l'O_2 par des enzymes qui produisent de l'eau avec ou sans étape intermédiaire de production d'hydrogène.
- Régénération des enzymes oxydés.

Symptômes de l'intoxication à l'oxygène

- Anxiété
- Tremblement

8 Ce sont les chiffres les plus communément admis.

- Bourdonnements d'oreilles
- Irritabilité
- Vertiges
- Convulsions
- Euphorie
- Nausées
- Réduction du champ visuel
- Vision en effet de tunnel

Ces symptômes ne sont pas toujours faciles à détecter sous l'eau et apparaissent généralement sans signes précurseurs, mais ils sont généralement annoncés par le tremblement des lèvres. Dès que ce symptôme apparaît il faut remonter prudemment pour éviter la surpression pulmonaire et faire chuter la PpO_2. Le NOAA a établi des tableaux qui définissent un temps maximum d'exposition à l'O_2 pour différentes PpO_2

Exposition Maximum à l'O_2 et le CNS(D'après le NOAA)

Tableau #2: Temps d'exposition à l'O2 (NOAA)

	Temps Maximum d'exposition en minutes (100% CNS)	
PpO_2	Plongée unitaire (ETL)	Cumulée en 24 h
0,6	720	720
0,7	570	570
0,8	450	450
0,9	360	360
1,0	300	300
1,1	240	270
1,2	210	240
1,3	180	210
1,4	150	180
1,5	120	180
1,6	45	150

Règles d'utilisations

- **Si en plongée unitaire on atteint la valeur limite du tableau il faut attendre 2 heures pour la plongée successive.**
- **Si on atteint la valeur limite du tableau en plongée successive dans une période de 24 heures il faut attendre 12 heures avant de replonger.**
- **Pour une successive avec un intervalle de moins de deux heures, il faut ajouter les temps de plongée et voir si on ne dépasse pas la valeur limite pour une plongée unitaire ; on utilise pour la détermination la PPO_2 la plus élevée.**

Exemple #4:

Hypothèses:

La première plongée est d'une durée de 35 minutes à la profondeur de 30m en utilisant un NITROX 36. La plongée successive est d'une durée de 40 minutes à la profondeur de 20m en utilisant un NITROX 36, l'intervalle entre les deux plongée est de 1hr30 minutes

Questions :

a)La plongée successive peut elle se faire ?
b)Quelle est la durée maximale de la plongée successive?

Solutions :

Plongée 1: PpO2= 4x36/100= 1,44 bar soit 1,5
Plongée 2: PpO2=3x36/100=1,08 bar soit 1,1
Intervalle de moins de deux heures, il faut ajouter les temps des plongées

Réponse à la question a
Soit 35 +40 =75 minutes ; la table donne pour une PPO2 de 1,5 un temps maximum de 120 minutes donc la 2ème plongée peut se faire.

Réponse à la question b
120-35= 85 minutes

Le NOAA a établi un système qui permet d'évaluer l'intoxication du système nerveux central par l'O_2, qui est une véritable "horloge" de l'intoxication, le **CNS clock (Central Nervous System)** [9] exprimé en % de la durée maximum d'exposition. Plus la valeur est proche de 100%, plus le risque d'intoxication est grand. Ce système de calcul est largement répandu dans toutes les associations de plongeurs NITROX.

% CNS=100 x DTD / ETL (6)

DTD: Temps de plongée à une profondeur déterminée (Dive Time at given Depth)
ETL: Temps d'exposition maximum à une PPO2 donnée (Exposure Time Limits)

Exemple #5

Hypothèse:

On effectue une plongée de 45 minutes à la profondeur de 29m au NITROX 36

Question:

Quel est le % de CNS?

Solution:

PpO_2= 3,9x36/100= 1,4 bar Suivant le tableau:
ETL = 150 et DTD=45
%CNS =100x45/150=30%

9 Système nerveux central (cerveau)

Tableau #3:Détermination du %CNS suivant un tableau pré établi.
Ce tableau donne le % CNS par minute de plongée en fonction de la PpO_2

PpO_2	%CNS/ min	Temps max de plongée	PpO_2	%CNS/ min	Temps max de plongée
0,60	0,14	571	1,18	0,46	174
0,62	0,14	571	1,20	0,47	170
0,64	0,15	533	1,22	0,48	167
0,66	0,16	500	1,24	0,52	154
0,68	0,17	471	1,26	0,52	154
0,70	0,18	444	1,28	0,54	148
0,72	0,18	444	1,30	0,56	143
0,74	0,19	421	1,32	0,57	140
0,76	0,20	400	1,34	0,60	133
0,78	0,21	381	1,36	0,62	129
0,80	0,22	364	1,38	0,63	127
0,82	0,23	348	1,40	0,65	123
0,84	0,24	333	1,42	0,68	118
0,86	0,25	320	1,44	0,71	113
0,88	0,26	308	1,46	0,74	108
0,90	0,28	286	1,48	0,78	103
0,92	0,29	276	1,50	0,83	96
0,94	0,30	267	1,52	0,93	86
0,96	0,31	258	1,54	1,04	77
0,98	0,32	250	1,56	1,19	67
1,00	0,33	242	1,58	1,47	54
1,02	0,35	229	*1,60*	*2,22*	*36*
1,04	0,36	222	*1,62*	*5,00*	*16*
1,06	0,38	211	*1,65*	*6,25*	*13*
1,08	0,40	200	*1,67*	*7,69*	*10*
1,10	0,42	190	*1,70*	*10,00*	*8*
1,12	0,43	186	*1,72*	*12,50*	*6*
1,14	0,43	186	*1,74*	*20,00*	*4*
1,16	0,44	182	*1,77*	*25,00*	*3*

Exemple #6
Hypothèse:
On effectue une plongée à -35m au NITROX 32 d'une durée de 25 minutes, puis en fin de plongée on se balade pendant 40 minutes à -12 mètres et on termine la plongée avec 15 minutes de paliers à 3m à l'O_2 pur

Question::
Calculer le %CNS?

Solution:

PpO_2(-35) NITROX 32 =4,5x32/100=1,44
Le tableau donne la valeur de 0,71% par minute soit un total partiel de 0,71x25= 17,8%
PpO_2(-12)NITROX 32=2,2x32/100=0,7
Le tableau donne la valeur de 0,18% par minute soit un total partiel de 0,18x40= 7,2%
PpO_2(-3) O2 pur: 1,3 bar
Le tableau donne la valeur de 0,56% par minute soit un total partiel de 0,56x15= 8,4%
Soit un total de %CNS de 17,8+7,2+8,4=33,4%

Diminution du %CNS

En surface le % de CNS va décroître exponentiellement avec une période de 90 minutes, ce qui signifie que toutes les 90 minutes le %CNS sera divisé par deux. Ce qui peut se traduire par la relation mathématique:

$$\%CNS_{(t)} = \%CNS_{(t0)} \times (0.5)^{(t/90)} \quad (7\text{-}1)$$
$$\%CNS_{(t)} = \%CNS_{(t0)} \times e^{(-kt)} \quad (7\text{-}2)$$

$\%CNS_{(t)}$= %CNS calculé au temps t
t = Intervalle de surface en minutes
e=2,718
$\%CNS_{(t0)}$= %CNS juste a la sortie de la dernière plongée,
k = -1/90 ln (1-50/100) =0,0077016

Tableau #4: réduction du %CNS en fonction de l'intervalle de surface

	Intervalle de surface en minutes								
% CNS(t0)	15	30	60	90	120	180	240	300	360
100	89	79	63	50	40	25	16	10	6
95	85	75	60	48	38	24	15	9	6
90	80	71	57	45	36	23	14	9	6
85	76	67	54	43	34	21	13	8	5
80	71	64	50	40	32	20	13	8	5
75	67	60	47	38	30	19	12	7	5
70	62	56	44	35	28	18	11	7	4
65	58	52	41	33	26	16	10	6	4
60	53	48	38	30	24	15	9	6	4
55	49	44	35	28	22	14	9	5	3
50	45	40	32	25	20	13	8	5	3
45	40	36	28	23	18	11	7	4	3
40	36	32	25	20	16	10	6	4	3
35	31	28	22	18	14	9	6	3	2
30	27	24	19	15	12	8	5	3	2
25	22	20	16	13	10	6	4	2	2
20	18	16	13	10	8	5	3	2	1
15	13	12	9	8	6	4	2	1	1
10	9	8	6	5	4	3	2	1	1

Ce type de calcul est assez difficile à faire sans calculatrice scientifique, c'est pourquoi nous vous proposons d'utiliser le tableau suivant qui donne de bonnes valeurs approximatives de la réduction du %CNS en fonction de l'intervalle de surface.

Exemple #7
Question:
Que devient le %CNS, de notre exemple précédent après 2 heures d'intervalle?

Solution:
$\%CNS_{(t0)}$ =33,4%
t = 2 x60 = 120 minutes (t/90)=120/90=1,333
$\%CNS_{(t)}=33,4 \times (0,5)^{1,333}$
$\%CNS_{(t)}$ =33,4 x 0,397 = 13,25 %

A l'aide de la relation 7-3 [10] on peut facilement calculer le temps nécessaire pour la diminution du %CNS jusqu'à une valeur fixée.

$$t = \left[\frac{-1}{k}\right] \ln \left[\frac{\%CNS_{(t)}}{\%CNS_{(t0)}}\right] \quad (7\text{-}3)$$

Exemple #8
Question:
Calculer le temps entre deux plongée pour passer d'un CNS de 100% à un CNS de 40%?

Solution:
t = -(1/0,0077016) ln (40/100)
= (- 129,84) x (-0,91629)= 119 minutes soit 2 heures

Exemple #9
Question:
Calculer le temps entre deux plongée pour passer d'un CNS de 100% à un CNS de 50%?

Solution:
t = -(1/0,0077016) ln (50/100)= (- 129,84) x (-0,693147)= 90 minutes

Tableau #5: Intervalle de temps pour une réduction du CNS pré-établie

Exemple #10
Question:
Quel intervalle faut il considérer pour passer d'un CNS de 80% à un CNS de 35%?

Solution:

10 In est un logarithme naturel ou nepérien (du mathématicien Neper) c'est un logarithme de base e (2.718)

Le tableau ci-après donne un intervalle de 107 minutes soit 110 minutes.

	%CNS (t)														
% CNS (t0)	**100**	**95**	**90**	**85**	**80**	**75**	**70**	**65**	**60**	**55**	**50**	**45**	**40**	**35**	**30**
100	0	7	14	21	29	37	46	56	66	78	90	104	119	136	156
95		0	7	14	22	31	40	49	60	71	83	97	112	130	150
90			0	7	15	24	33	42	53	64	76	90	105	123	143
85				0	8	16	25	35	45	57	69	83	98	115	135
80					0	8	17	27	37	49	61	75	90	107	127
75						0	9	19	29	40	53	66	82	99	119
70							0	10	20	31	44	57	73	90	110
65								0	10	22	34	48	63	80	100
60									0	11	24	37	53	70	90
55										0	12	26	41	59	79
50											0	14	29	46	66
45												0	15	33	53

Règles d'utilisations
Le NOAA recommande:
- **D'interrompre la plongée lorsque le CNS atteint 75 %**
- **De ne pas faire une plongée successive tant que le CNS n'est pas redescendu sous 40%**

Facteurs influençant l'apparition des symptômes hyperoxiques

- Les plongées multi-successives
- Le stress
- La fatigue
- Les efforts intenses
- La température, inférieure à 10°C
- La température supérieure à 30°C
- L'excès de CO_2

Conduite à tenir en cas de crise hyperoxique.

Les deux dangers les plus importants qui guettent un plongeur en crise hyperoxique sont:

- Perte du détendeur et noyade.
- La surpression pulmonaire.

En cas de crise il faut faire diminuer la PpO_2, l'idéal étant de repasser à l'air et de remonter avec beaucoup de précautions. Durant les premières phases de la crise le larynx peut se bloquer, il faut donc veiller à remonter très lentement avec beaucoup de précaution en maintenant la tête de la victime en hyper-extension

L'effet Lorrain - Smith

C'est le deuxième effet néfaste de l'O_2 il peut s'apparenter à une "pneumonie chimique" qui réduit la capacité vitale[11]. Cet effet ne se manifeste que pour des expositions à des PpO_2 supérieures à 0.5 bar et pour des durées d'expositions longues. Cet effet est négligeable pour la plongée loisir. Pour quantifier cette intoxication, le NOAA à développé le concept de l'OTU (Oxygen Tolerance Unit). Certains auteurs utilisent le terme UPTD (Unit of Pulmonary Toxic Dose) pour désigner l'OTU. On considère que pour une plongée l'accroissement de 625 OTU est parfaitement acceptable.

Symptômes

- Gène au niveau de la cage thoracique
- Douleur an niveau des bronches
- Douleur et toux sèche incontrôlable, aggravée à l'inspiration
- Diminution de la capacité vitale

Détermination de l' Oxygen Tolerance Unit (*inst)

On peut utiliser la formule suivante pour déterminer l'indice de toxicité pulmonaire, t représente le temps d'exposition en minutes et PpO2 la pression partielle d'oxygène.

$$\mathbf{OTU = t \times [(PpO_2 - 0,5)/0,5]^{0,833} \quad (8)}$$
$$\mathbf{Kp=[(PpO_2 - 0,5)/0,5]^{0,833} \quad (9)}$$

De (8) et (9) on peut écrire que:

$$\mathbf{OTU = t \times Kp \quad (10)}$$

Tableau #6: Coefficient Kp

Pour faciliter le calcul, nous donnons ci-dessous les valeurs du coefficient Kp en fonction de la pression partielle d'O2 (PpO2). Il suffit d'utiliser la formule (10) pour trouver l'indice de toxicité pulmonaire.

Exemple #11

Question:

Quel est l'OTU pour une plongée de 30 minutes à la pression partielle de 1,4 bar?

Solution:

Le tableau ci-après donne, pour une PPO_2 de 1,4 bars, une valeur de Kp égale à 1,632
OTU= 1,632x30= 48,96 ce qui est largement inférieur à la limite de 625.

11 La capacité vitale est la différence entre le volume pulmonaire du niveau inspiratoire maximal et le niveau expiratoire maximal

Exemple #12

Question:

Quel est la durée maximum d'exposition pour une PpO_2 de 1,2 bar?

Solution:

Pour 1,2 bar le tableau donne une valeur de Kp=1,324
625= t x 1,324
t = 625/1,324= 472 minutes soit presque 8 heures.

PpO_2	Kp	PpO_2	Kp	PpO_2	Kp
0,6	0,262	0,98	0,967	1,36	1,571
0,62	0,305	1	1	1,38	1,601
0,64	0,346	1,02	1,033	1,4	1,632
0,66	0,387	1,04	1,066	1,42	1,662
0,68	0,427	1,06	1,099	1,44	1,692
0,7	0,466	1,08	1,132	1,46	1,722
0,72	0,505	1,1	1,164	1,48	1,752
0,74	0,543	1,12	1,196	1,5	1,781
0,76	0,58	1,14	1,228	1,52	1,811
0,78	0,617	1,16	1,26	1,54	1,841
0,8	0,653	1,18	1,292	1,56	1,87
0,82	0,69	1,2	1,324	1,58	1,899
0,84	0,725	1,22	1,355	1,6	1,929
0,86	0,761	1,24	1,386	1,62	1,958
0,88	0,796	1,26	1,417	1,64	1,987
0,9	0,83	1,28	1,448	1,66	2,016
0,92	0,865	1,3	1,479	1,68	2,045
0,94	0,899	1,32	1,51		
0,96	0,933	1,34	1,541		

Réduction capacité vitale

La réduction de la capacité vitale peut se calculer par la relation ci-dessous ou %CV est le pourcentage de réduction de la capacité vitale, PpO_2 la pression partielle d'oxygène et t la durée d'exposition à cette pression partielle.

$$\mathbf{\%CV = - 0,011(PpO_2 - 0,5) \times t \quad (11)}$$

Exemple #13

Question:

En reprenant les données des exemples #11 Et #12, trouver les réductions de la capacité vitale?:

Solution:

De l'exemple#11 on déduit
%CV= -0,011(1,4-0,5)x30= -0,297 %

De l'exemple #12on déduit
%CV= -0,011(1,2-0,5)x472= 3,6 %

Chapitre 2

Planification et Gestion de la plongée

Niveau :

Spécialité plongeur NITROX
Divemaster
Instructeur

Avant-propos

Toutes les règles de plongée à l'air restent valable pour la plongée NITROX. Le respect de la planification au NITROX est impératif.

L'avant plongée

Prise en charge de la bouteille

- Vérification de la bouteille, Numéro, date de réépreuve, marquage NITROX, étiquettes
- Vérification de la pression de la bouteille
- Vérification du %d'O_2 avec l'oxymètre (ne pas oublier de l'étalonner)
- Calculer la profondeur maximum d'utilisation
- Vérifier si l'étiquette sur la bouteille est correctement remplie en fonction des différents paramètres mesurés
- Compléter et signer le registre de gonflage.

Choix du mode de décompression

→ Ordinateur de plongée option NITROX
→ Table NITROX adaptée au % d'O_2
→ Table à l'air et calcul de la profondeur équivalente

Détermination des paramètres

- Choix de la PpO_2 (froids, courant…) et détermination de la profondeur
- Calculer et noter la profondeur équivalente
- Vérification de son %CNS de départ
- Détermination de la durée maximum de plongée
- Vérifier en fonction de ces paramètres si le %CNS en fin de plongée est acceptable, au besoin modifier les paramètres (profondeur et temps)

Détermination des procédures d'urgence, principalement pour l'hyperoxie.

La plongée

- Ne pas aller au delà des paramètres calculés, respecter la planification

© Jean-Claude Taymans

L' après plongée

- Calculer son %CNS réel
- Indiqué dans son carnet, en plus des données classiques les paramètres propre à la plongée NITROX
  - %CNS
  - Type de mélange
  - Mode de décompression

Exemple #14 planification d'une plongée NITROX avec une plongée successive
Hypothèses:
Nous utilisons pour nos plongées un NITROX 36 et les tables IDEA 21%O_2. Nous envisageons une première plongée d'une durée de 40 minutes à la profondeur de 30m. Après un intervalle de surface de 5 heures on décide de faire une plongée de 30 minutes à la même profondeur et en utilisant le même mélange.

Question:
Vérifiez les paramètres de plongée et au besoin modifiez les, justifiez vos choix?

Solution:

Paramètres de la première plongée

PpO_2: la formule (4) donne 1,44 bar
Ce qui est un rien excessif, on va donc limiter la PpO_2 à 1,4 bar ce qui donne une profondeur maximum de 28,8m soit 28m

Profondeur équivalente: la formule (5) donne 20.8 soit 21m

On entre dans la table avec la profondeur de 21m et une durée de 40 min ce qui nous donne un indice de saturation H. On fait un palier de principe de 5 minutes à -5 m

Le tableau (6) nous donne un %CNS 26 (plongée)+~ 0,7(palier) = 27%

Récapitulatif

- ***Profondeur réelle: 28m***
- ***EAD: 21m***
- ***PpO_2= 1,4 bar***
- ***Palier: 5 minutes à -5m***
- ***Indice de saturation H***
- ***%CNS:27%***

Paramètres de la plongée successive
la majoration est de 9 minutes, soit un temps table de 39 minutes et un indice de saturation H. Ces valeurs sont acceptables dans le cadre de la plongée loisir (la courbe de "sécurité" pour une profondeur de 21m une valeur de 40 minutes)

Le CNS de départ est de 2,98 suivant le tableau de la formule (7) soit 3. Et le CNS de fin de plongée est de 27+3=30%
Récapitulatif:

- ***Profondeur réelle:28m***
- ***EAD:21m***
- ***PpO_2 = 1,4 bar***
- ***Palier: 5 minutes à -5m***
- ***Indice de saturation en début de plongée : B***
- ***Majoration: 9 minutes***
- ***Temps table: 39minutes***
- ***%CNS en début de plongée : 3%***
- ***Indice de saturation en fin de plongée H***
- ***%CNS en fin de plongée: 30%***

Gestion de la plongée

Avant-propos

Pour gérer sa plongée il existe bien sûr la manière traditionnelle des tables mais aussi des moyens électroniques qui sont soit des ordinateurs soit des logiciels qui recalculent les tables en fonction des paramètres de plongée. Le but de ce chapitre n'est pas de faire l'apologie de l'une ou de l'autre méthode ; de l'une ou de l'autre philosophie de la plongée ; de l'un ou de l'autre algorithme de calcul mais bien de donner au lecteur une idée aussi complète que possible de ce qui existe sur le marché. A lui de faire sont choix en fonction de ses desiderata. Le but n'est pas non plus d'épiloguer sur la fiabilité et la sécurité comparée des divers systèmes. Tous les protocoles sont bons et aucun ne l'est, le risque zéro n'existe pas, le seul moyen d'être sûr de ne jamais faire d'ADD est de ne jamais plonger. Un bon moyen de minimiser le risque est de ne jamais utiliser les extrêma des protocoles ou des profils à risques[12].

Les tables

Les tables sont le moyen le plus simple et le plus économique de gérer sa plongée. Généralement les tables utilisées pour le NITROX sont des tables « Air » recalculées en fonction du pourcentage d'oxygène. En Europe les tables les plus couramment utilisées sont les US Navy ainsi que les tables

12 Profil en « dents de scie », « yoyo », successives multiples…

dérivées de celle ci comme la TPL de PADI qui a été recalculée pour le NITROX 32 et 36. Certains pays comme la France ont adopté leurs propre tables la MN 90 qui n'est utilisée qu'en France métropolitaine et DOM-TOM. D'autres pays comme la Suisse ont adopté dans une large mesure les tables Bülhmann mieux adaptées à l'altitude, et les Néerlandais les DCIEM canadiennes.
Le NOAA aux Etats-Unis à développé des tables spécifiques pour deux types de NITROX le 32 et le 36, elles ont l'avantage d'être très simples à utiliser et de ne nécessiter aucun calcul préalable.

Tables du NOAA

NITROX 32
http://www.ndc.noaa.gov/pdfs/nitrox32.pdf
NITROX 36
http://www.ndc.noaa.gov/pdfs/nitrox36.pdf

Le gros inconvénient des tables est qu'elles ne conviennent pas pour des plongées complexes, utilisant plusieurs NITROX et/ou de l'oxygène en décompression, ce qui pour la plongée loisir n'est pas un gros problème d'autant plus que certains protocoles existent pour l'utilisation d'oxygène aux paliers de 3 et 6 mètres.

Les ordinateurs

Le but de ce paragraphe n'est pas de donner toutes les caractéristiques des ordinateurs et tous les détails des modes opératoires, mais de fournir au lecteur un aperçu de ce qui existe avec en bref les points marquants des différents types d'appareils. Malgré le fait que cet ouvrage soit axé sur le NITROX nous avons également donné quelques informations sur les ordinateurs multi-gaz car suivant l'adage populaire « qui peut le plus, peut le moins »

Les ordinateurs de plongée NITROX permettent de gérer des plongées avec des mélanges contenant entre 21 et 50 % d'O_2. Ils respectent les limites d'utilisation édictées par le NOAA et prennent en charge les calculs de décompression, le %CNS et la charge toxique (OTU) cumulée sur une série de jours de plongée. Dans certaines limites il est possible de programmer leurs paramètres, soit directement sur la console ou par l'intermédiaire d'un PC pourvu d'une carte d'interface adéquate et d'un soft spécifique.
Il existe aussi des ordinateurs qui permettent de gérer de multiples gaz (NITROX, TRIMIX, Oxygène pur) pour la plongée et la décompression, certaines de ces machines peuvent même être connectée à des recycleurs ce qui a comme avantages : d'une part optimaliser la décompression et d'autre part contrôler en permanence la fraction d'oxygène dans la boucle de recyclage.

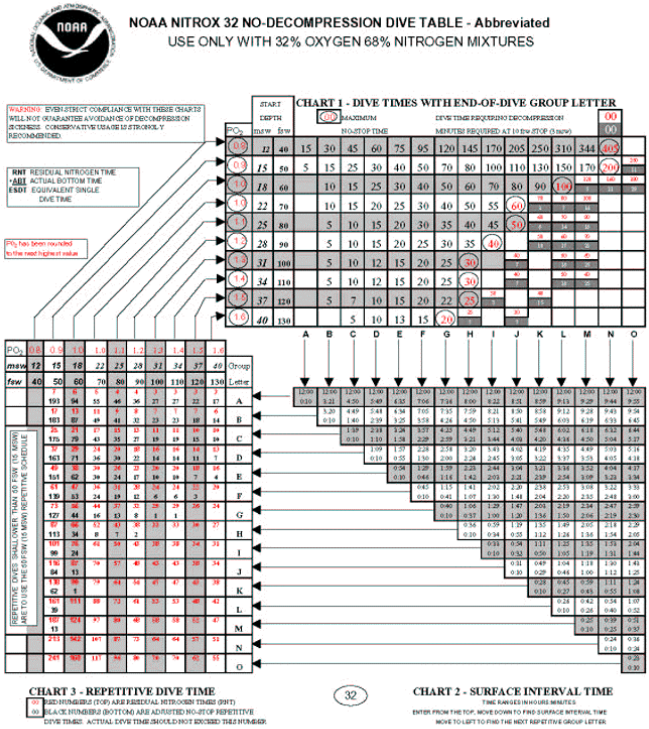

NOAA NITROX 32 NO-DECOMPRESSION DIVE TABLE - Abbreviated
USE ONLY WITH 32% OXYGEN 68% NITROGEN MIXTURES
CHART 1 - DIVE TIMES WITH END-OF-DIVE GROUP LETTER
CHART 3 - REPETITIVE DIVE TIME
CHART 2 - SURFACE INTERVAL TIME
32

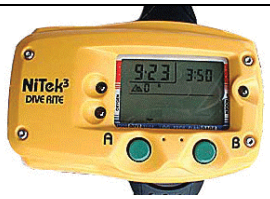
image donnée à titre informatif, uniquement pour visualiser la forme de la table, vous pouvez voir les originaux sur le site du NOAA

Les logiciels de décompression

Il y a quinze ans lorsque nous évoquions ne fut ce que le principe d'un calculateur pouvant établir des tables de décompression à la demande suivant des paramètres très variés nos « monos » nous regardaient comme s'ils avaient vu l' « anté-Christ » en personne. Quelques années après les vagues de développement informatique venues d' outre-atlantique ont balayé tous ces vieux principes. Les outils dont nous rêvions les américains les ont réalisés !
La plupart de ces logiciels utilisent un modèle haldanien ou l'algorithme Bühlmann, certains utilisent les modèles à micro-bulles VPM (Varying Permeability Model), certains permettent même l'option « paliers profonds » si chère à Richard Pyle. L'avantage des paliers profonds est de mieux coller à la courbe de désaturation et diminuer ainsi le « stress » physique lié à cette décompression.

Les principaux ordinateurs sur le marché

	Aladin Nitrox Pro Ordinateur d'une conception ancienne, qui ne gère qu'un gaz il à été « relooké » et permet de gérer un NITROX comprenant entre 21 et 50% d'oxygène. Il peut être muni d'un transmetteur qui mesure la pression dans la bouteille et le débit ventilatoire. Modèle de décompression :Bühlmann ZHL8-ADT. Prix : entre 600 et 900 euros suivant la configuration http://www.uwatec.com/french/SPEC-ER.htm
	Suunto Vytec Cet ordinateur permet de gérer trois NITROX qui contiennent entre 21 et 99% d'oxygène. Il peut aussi être muni d'un transmetteur. Prix : entre 550 et 950 euros suivant la configuration http://www.suunto.com/
	Suunto Vyper Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Il peut aussi être muni d'un transmetteur. Ordinateur basic qui convient bien au débutants Prix : de l'ordre de 350 euros http://www.suunto.com/
	Mares M1 RGBM Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Il utilise l'algorithme RGBM qui permet de gérer en option des paliers profonds. Prix : de l'ordre de 300 euros http://www.mares.com/
	Océanic Versa Pro Cet ordinateur permet de gérer un NITROX qui contient entre 21 et 50% d'oxygène. Le design de l'écran est particulièrement convivial. http://www.oceanicworldwide.com
	VR2 & VR3 Ce sont deux ordinateurs multi-gaz en circuit ouvert ou recycleur (CCR –SCR) le VR2 (4 gaz) est axé sur le Nitrox tandis que le VR3 (10 gaz) intègre le NITROX, TRIMIX, HELIOS, HELIAIR. Prix : VR2 de 750-800 euros VR3 : de l'ordre de 1200 euros http://www.vr3.co.uk/vr2.htm http://www.vr3.co.uk/vr3.htm
	Buddy Nexus Cet ordinateur est un peu particulier puisque cet appareil a été conçu au départ pour être utilisé avec les recycleurs en circuit fermé (CCR) mais il peut être utilisé en mode circuit ouvert. Il est prévu pour être utilisé avec deux gaz. Prix : de l'ordre de 500 euros http://www.apvalves.com/Nexus.html

	**Dive Rite Nitek 3 et Nitek He** Ce sont des ordinateurs multi-gaz qui permettent de gérer des mélanges contenant de l' oxygène, de l'azote, de l'hélium dans des proportions allant de 0 à 100 %. Nitek 3 gère 3 mélanges composés d'O2 et de N2 et le Nitek He 7 mélanges composés de O2, N2 et He. Prix : Nitek 3 de l'ordre de 500$ Nitek He : de l'ordre de 1100 $ http://www.dive-rite.com/
	HydroSpace Engineering Inc. HS Explorer ***Le must en matière d'ordinateur multi-gaz***. Cet ordinateur permet de gérer 10 gaz différents dont les proportions, d'oxygène, d'azote et d'hélium varient entre 0 et 100%, il peut être utilisé en circuit ouvert ou pour des recycleurs. Il est possible de lui connecter jusqu'à trois sondes de PpO2 pour contrôler la fraction d'oxygène dans les boucles des recycleurs à circuit fermé ou semi-fermé et établir ainsi un protocole de décompression suivant l' algorithme RGBM (Reduced Gradient Bubble Model). Il peut aussi servir d'analyseur O2. Prix : Entre 1200 et 1300$ http://www.hs-eng.com/ Dans ce Cd-Rom vous trouverez le manuel de cet ordinateur ainsi qu'un programme de simulation qui sont reproduits avec l'autorisation de HydroSpace Engineering

Les principaux logiciels de décompression sur le marché

Abyss	Programme très complet, très paramétrable (presque à outrance) est basé sur un modèle haldanien. Le programme existe en plusieurs versions qui vont du NITROX loisir jusqu'au TRIMIX avancé. Les prix s'échelonnent entre 34 et 350 euros. http://www.technodive.com/abyss/
V-Planner	Logiciel très facile à utiliser, pas de blabla inutile il va directement à l'essentiel. L'algorithme utilisé est basé sur les modèles à micro bulles VPM (Varying Permeability Model). IANTD à choisi ce logiciel pour ses cours TRIMIX. Ce logiciel est un Shareware vendu au prix de 50 euros et est téléchargeable sur le Net dans sa version intégrale. http://www.hhssoftware.com/v-planner-fr/index.html
GAP - RGBM	Un des seuls logiciels développés en Europe, il est basé sur les travaux du Dr. B.R.Wienke sur le RGBM (Reduced Gradient Bubble Model) et sur l'algorithme Bühlmann. Les prix vont de 49 à 180 euros suivant la version. http://www.gap-software.com/
Decoplanner	Ce logiciel est basé sur les algorithmes Bühlmann ZH-L16B et C, très utilisé au USA il est recommandé par le GUE (Global Underwater Explorers) qui fait autorité « outre flaque » en matière de plongée TEK. Il peut non seulement gérer des plongées NITROX mais aussi des plongées TRIMIX et HELIOX jusqu'à des profondeurs très importantes. Le prix est de l'ordre de 90$ http://www.gue.com/decoplanner/

Chapitre 3

Matériel et préparation du matériel

Niveau :

Spécialité plongeur NITROX
Divemaster
Instructeur
Spécialité Gaz Blending

Règles générales édictées par le NOAA

- Tous les gaz utilisés en plongée doivent être de qualité respiratoire
- Le matériel qui est susceptible d'être en contact avec un mélange contenant plus de 40 % d'O_2 doit être nettoyé et dégraissé pour un service à l'O_2 pur. Tous les joints et clapets doivent être compatible pour l'O_2 pur
- Le montage du matériel, l'entretien et la mise en conformité pour l'O_2 pur doivent être exécuté par un spécialiste

Bouteille

La plupart des centres de plongée remplissent les bouteilles par la méthode dite des "pressions partielles" et injecte de l'O_2 pur dans la bouteille, de ce fait la bouteille et le robinet doivent être parfaitement dégraissés et les joints compatibles à l'O_2 pur. La bouteille doit être frappée avec la mention NITROX et posséder un certificat de conformité pour le NITROX délivrée par un service agrée (Apragaz……), elle devra être pourvue d' une mention NITROX sur une large bande jaune/vert et posséder une étiquette marquable reprenant le %O_2, la date de remplissage et la profondeur maximum d'utilisation.

A proscrire absolument:

- Les films anti-corrosion (paraffine….) à l'intérieur de la bouteille
- Les robinets à ouverture rapide (robinet 1/4 de tour) qui engendre des risques de flash[13] par frottement

Une nouvelle génération de bouteilles à tendance à percer sur le marché ce sont les bouteilles en fibre de Carbone/Kevlar (WORTHINGTON) qui sont parfaitement adaptées au NITROX , elle sont non corrodable.

Detendeur

Utilisation d'un NITROX avec moins de 40% d'O_2
Il ne faut pas de détendeur spécifique, ont peut utiliser son détendeur "air"
Utilisation d'un NITROX avec plus de 40% d'O_2
Le détendeur doit être nettoyé et dégraissé les membranes, joints et clapets doivent être compatibles pour l'O2 (VITON). Ce détendeur

13 Combustion spontanée

ne peut servir que pour le NITROX et doit être marqué à cet effet (volant de manœuvre vert, casserole du second étage jaune/vert)

Manomètre

Utilisation d'un NITROX avec moins de 40% d'O_2
Il ne faut pas de manomètre spécifique, on peut utiliser son manomètre "air"

Utilisation d'un NITROX avec plus de 40% d'O_2
Le manomètre doit être compatible à l'O2

Gilet de stabilisation

Utilisation d'un NITROX avec moins de 40% d'O_2
Pas de précaution particulière

Utilisation d'un NITROX avec plus de 40% d'O_2
Il est impératif d'utiliser une source de gonflage indépendante (air)

Costumes secs

Utilisation d'un NITROX avec moins de 40% d'O_2
Pas de précaution particulière, mais il est conseillé d'utiliser une source de gonflage indépendante de minimum 300 litres, air ou de préférence Argon, qui donne une meilleure isolation thermique, l'argon donne une protection thermique trois fois supérieure à l'air.

Utilisation d'un NITROX avec plus de 40% d'O_2
Il est impératif d'utiliser une source de gonflage indépendante, l'argon est fortement conseillé car la durée des plongées avec de tels mélanges est généralement importante.

Préparation du matériel

Matériaux <u>NON</u> compatibles avec l'oxygène

Tableau #7

Matériaux	Remarques
Graisse	Toutes les graisses non spécifiques
Aluminium	L'aluminium pur et tous ses alliages
Titane	Le Titane pur et tous ses alliages
Acier	Toutes les nuances saufs les Inox austénitiques

Matériaux compatibles avec l'oxygène *Tableau #8*

Matériaux	Remarques
Acier Inox	Compatible pour les nuances qui contiennent un fort pourcentage de chrome et de nickel (nuances 304 et 316) ce sont des aciers austénitiques. Les aciers inox ferritiques ne sont pas compatibles.
Laiton	Totalement compatible
Joint Buna-Nitrile (Couleur noire)	Plus ou moins compatible se désagrège rapidement
Joint Viton (Fluoro Carbone) (Couleur verte)	Assez compatible mais il dégage des vapeurs toxiques lorsqu'il brûle.
Joint Silicone (Couleur rouge)	Très compatible même à haute température, mais ne peut être utilisé que dans des montages statiques. Demande une précision d'usinage très importante , pour cette raison il est peu utilisé pour du matériel de plongée.
plastiques des détendeurs (ABS…)	Bien compatibles
Téflon en ruban	Il faut demander les nuances compatibles
Graise PERCO B	Graisse silicone compatible

Dégraissage du petit matériel

Le dégraissage du matériel, la question qui revient le plus souvent sur tout les forums de discutions, je ne connais qu'une façon de dégraisser : la bonne c'est à dire la méthode qui permet d'éliminer toutes les particules de graisse et d'huile. Bien sûr éliminer jusqu'à la dernière molécule est un vœux pieux mais on peut tenter de s'approcher de cet objectif en combinant les techniques. Bien souvent on pense que le passage dans un bac à ultrasons suffit à tout éliminer, je n'en suis pas si sûr…ce bac sert surtout à détartrer, pas à dégraisser. Tout le petit matériel qui est susceptible d' entrer en contact avec un mélange qui contient

<u>plus de 40 % d'oxygène doit être dégraissé au moins une fois par an.</u>

Pour effectuer un bon dégraissage il faut :

1. Commencer par démonter le matériel le plus complètement possible

2. Ne pas se contenter de faire tremper les pièces métalliques dans du Trichloréthylène, Perchloréthylène ou de l'acétone mais les brosser énergiquement en insistant sur les petits recoins.
3. Eliminer totalement les traces de Trichloréthylène et d' Acétone avec un rinçage énergique à l'eau très chaude contenant du produit de vaisselle. L'idéal est de placer les pièces dans le lave-vaisselle, les petites pièces dans une chaussette pour éviter de les perdre
4. Recommencer l'opération au moins deux fois.

Quelques précautions si on utilise du Trichloréthylène, Perchloréthylène ou de l'acétone.

- Le Trichlo, le Perchlo et l' Acétone sont des produits nocifs et dangereux, il faut les utiliser avec précaution dans des locaux bien aérés.
- Ne jamais fumer en présence de ces produits, non seulement c'est très nocif, mais **l' Acétone peut exploser**.
- Ne jamais tremper les mains nues dans ces produits
- Ne jamais mélanger ces produits entre eux ou avec un autre produit dégraissant
- Toujours bien rincer après dégraissage.
- **Ne jamais tremper les matières plastiques et les joints dans ces produits ils sont inexorablement attaqués**

Les manomètres et flexibles sont impossible à dégraisser il faut les acheter d'origine en service oxygène.

Les dégraissants usuels *Tableau #9*

Nom	Puissance	Utilisations	Toxicité
Acétone	Fort	Métaux	Très toxique
Trichlor-éthylène	Fort	Métaux	Très toxique
Perchlor-éthylène	Fort	Métaux	Très toxique
Teepol	Moyenne	Métaux, Plastiques, joints	Alimentaire
Liquide pour vaisselle	Faible	Métaux, Plastiques, joints	Alimentaire

Nettoyage et dégraissage des bouteilles

Avant de dégraisser la bouteille il est impératif de débarrasser l'intérieur de la bouteille de toute trace de corrosion et de crasse. Le plus facile est d'utiliser une tonneleuse. Cet appareil permet de faire tourner les bouteilles sur elles-mêmes et est composé de deux cylindres actionnés par un petit moteur électrique, la bouteille à tonneler est posée sur les deux cylindres. Ont peut également utiliser une bétonnière pour effectuer cette opération, les bouteilles fixées à l'intérieur de celle-ci (Truc donné par Jacques Vettier dans son livre NITROX TRIMIX ed Ulmer). Pour effectuer un bon nettoyage il est important de bien choisir l'abrasif et le détergent. L'**abrasif ne peut jamais tourner à sec.**

Les abrasifs *Tableau #10*

Types	Bouteilles	Remarques
Gravier	Acier	Efficacité moyenne, à utiliser pour des bouteilles peu oxydées
Verre pilé	Acier/Alu/ Fibre de carbone	Efficacité faible. Excellent pour l'alu, pour l'acier ne peut enlever que quelques traces de rouille.
Bille de verre	Acier/Alu/ Fibre de carbone	Efficacité faible. Excellent pour l'alu, pour l'acier ne peut enlever que quelques traces de rouille.
Céramique	Acier/Alu/ Fibre de carbone	Efficacité faible. Excellent pour l'alu, pour l'acier ne peut enlever que quelques traces de rouille.
Corindon (alumine) **Existe en différentes densités**	Acier	Très efficace à ne pas utiliser avec de l'acide a cause d'un possible dégagement de gaz. L'efficacité est proportionnelle à la densité du produit.

Les détergents *Tableau #11*

Types	Bouteilles	Remarques
Liquide vaisselle + eau	Acier/Alu/ Fibre de carbone	R.A.S.
Teepol + eau	Acier/Alu/ Fibre de carbone	R.A.S.
Acide phosphorique	Acier	Dilué à 5%, ne **PAS** utiliser avec du Corindon
Solution de dérouillage	Acier	Ne **PAS** utiliser avec du corindon
Additif tonnelage	Acier	Dilué à 10% à utiliser avec le Corindon

La bonne pratique du tonnelage

1. Placer l'abrasif dans la bouteille à raison de 4 à 6 kg suivant la taille de la bouteille.
2. Remplir complètement la bouteille avec du détergent et boucher la bouteille, le bouchon faisant office de protection des filets.
3. Tonneler entre 15 et 90 minutes suivant l'état d'encrassement de la bouteille.
4. Vider et tamiser l'abrasif et le détergent, l'abrasif étant récupérable.
5. Rincer abondamment la bouteille au nettoyeur haute pression avec une bonne dose de liquide vaisselle ou de Teepol pour achever le dégraissage.
6. Retourner la bouteille sur un support pour vider l'eau et sécher à l'air chaud (décapeur thermique)

Tableau de décision

Tableau #12

Bouteille	Encrassement / Détergent→	Gravier					Verre					Céramique					Corindon				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Acier	Faible	X	X				X	X				X	X						I	I	
	Moyen	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X				I	I	
	Fort																X	X	I	I	X
Aluminium	Faible						X	X				X	X						I	I	
	Moyen						X	X				X	X						I	I	
Carbone insert Alu	Faible						X	X				X	X						I	I	
	Moyen						X	X				X	X						I	I	

1 : Liquide vaisselle et eau
2 : Teepol + eau
3 : Acide Phosphorique dilué à 5%
4 : Solution de dérouillage
5 : Additif tonnelage

I : INTERDIT

Chapitre 4

Compresseurs et centres de gonflage

Niveau :

Spécialité Gaz Blending
Divemaster
Instructeur

Composition de l'air sec

La vapeur d'eau est présente dans l'atmosphère dans des proportions comprises entre 0 ,1% pour les régions glacées de notre globe et 5% pour les zones tropicales. Les gaz indiqués en bleu dans le tableau sont les gaz appelés communément les « gaz rares ». La masse molaire de l'air est de 28,97

Tableau #13

Gaz	%
Azote (N_2)	78,09
Oxygène (O_2)	20,95
Hydrogène (H_2)	$5,0 \times 10^{-5}$
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,035
Ozone (O_3)	$1,0 \times 10^{-6}$
Hélium (He)	$5,24 \times 10^{-4}$
Krypton (Kr)	$1,0 \times 10^{-4}$
Néon (Ne)	$1,8 \times 10^{-3}$
Xénon (Xe)	$8,0 \times 10^{-6}$
Argon (A)	0,93
Radon (Rn)	$6,0 \times 10^{-18}$

L'air respirable.

Depuis 1999 la CEE à défini dans sa norme EN 12021 la qualité minimale que doit avoir l'air respirable, cette norme tient compte de quatre éléments présent dans l'air : la vapeur d'eau, les vapeurs d'huile, le dioxyde de carbone et le monoxyde de carbone.

- Vapeur d'eau : entre 40 et 200 bar 50 mg/m^3 ; à 300 bar 35 mg/m^3
- Vapeur d'huile : à 200 bar 0,5 mg/m^3
- Dioxyde de carbone (CO_2) : maximum 500 ppm
- Monoxyde de carbone (CO) : maximun 15 ppm

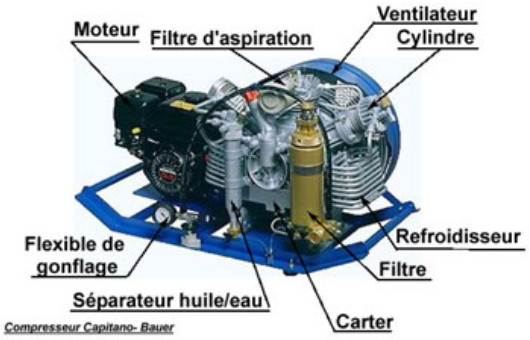
Depuis cette date les constructeurs de compresseurs sont tenus de ne mettre sur le marché que des machines qui répondent à cette norme.

Description générale.

Les stations de gonflage se composent généralement des éléments suivants :

- Un ou des compresseur(s) « Haute Pression ».
- Le(s) moteur(s) d'entraînement (s) du(des) compresseurs pour les petites unités mobiles il s'agit généralement d'un moteur thermique essence ou diesel.

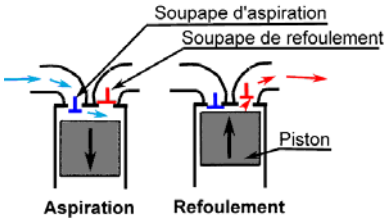
- Un système de refroidissement par air, le plus généralement, ou par eau pour les grosses unités.
- Un système de filtration incluant un séparateur d'eau et d'huile.
- Une rampe de gonflage avec un panneau de contrôle.
- Une ou plusieurs bouteilles tampons.
- Une tuyauterie d'aspiration munie d'un filtre primaire
- Le tuyautage haute pression entre le compresseur, les tampons et la rampe de gonflage.

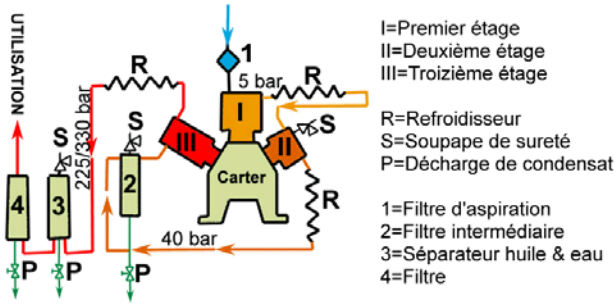


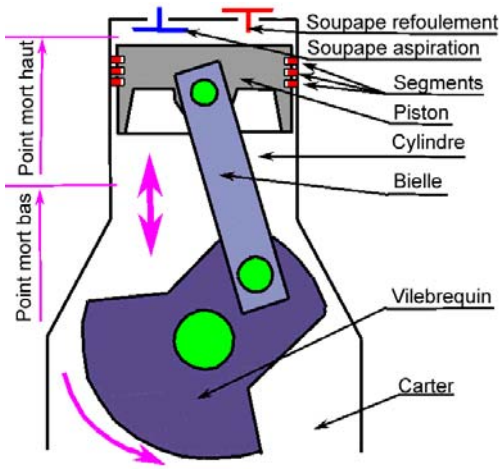
Pour les très petites unités fixes ou mobiles la « station de gonflage » est réduite a sa plus simple expression, c'est à dire un compresseur, un moteur, une unité de filtration, un ventilateur de refroidissement et un flexible de gonflage en guise de rampe. Le tout monté sur un châssis unique.

Le compresseur

Le compresseur est la partie essentielle d'une station de gonflage. Les compresseurs utilisés pour le gonflage des bouteilles sont des compresseurs à pistons. Le compresseur est une machine alternative qui dans un premier temps, lorsque le piston descend, aspire de l'air au travers de la soupape d'aspiration (ouverte), pour dans un deuxième temps, lorsque le piston remonte, refouler l'air à une pression déterminée au travers de la soupape de refoulement (ouverte). Le fonctionnement d'un compresseur est similaire au fonctionnement d'une pompe motorisée. Le vilebrequin et la bielle transforment le mouvement circulaire uniforme du moteur en un mouvement linéaire alternatif du piston. On définit le rapport volumétrique de compression, (communément appelé rapport de compression) comme le rapport entre le volume du cylindre piston au niveau bas et le volume du cylindre piston au niveau haut. Pour une raison d'échauffement le rapport de compression est limité ; donc pour obtenir la pression de gonflage des bouteilles il est nécessaire d'utiliser trois étages de compression séparés par des refroidisseurs. La lubrification des éléments mécaniques se fait par barbotage dans l'huile se trouvant dans le fond du carter et/ou par huile pressurisée. La pressurisation de l'huile est obtenue par une pompe qui injecte l'huile aux points de lubrification (segments, paliers…). Les huiles utilisées sont bien sûr non toxiques, doivent résister à des températures élevées et ne pas se décomposer sous les effets de la pression. Les compresseurs modernes n'utilisent plus que des huiles de synthèse. La précision d'usinage obtenue de nos jours rend les huiles minérales incompatibles avec les compresseurs de la dernière génération . La lubrification indispensable pour le bon fonctionnement du compresseur entraîne de l'huile dans l'air ce qui implique un traitement ultérieur de cet air pour le rendre respirable et conforme aux normes. L'étanchéité entre le cylindre et le piston est assurée à l'aide de segments métalliques, qui sont des anneaux ayant une certaine élasticité pour rattraper les usures et jeux.







Le moteur d'entraînement

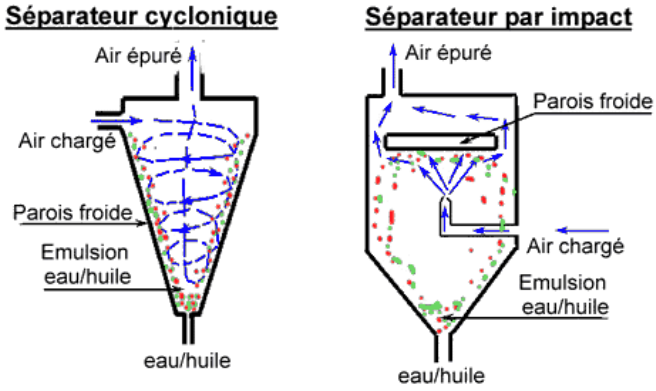
Dans les stations fixes, les compresseurs sont entraînés par des moteurs électriques monophasés pour les petites puissances et triphasés pour les puissances plus conséquentes. Les compresseurs des stations mobiles sont entraînés par des moteurs thermiques essence ou diesel. Le moteur entraîne le compresseur par l'intermédiaire d'un système de poulies et de courroies.
Le démarrage demande une énergie considérable et est un facteur d'usure important pour cette raison on les limites à 3-4 par heure. Pour les petits compresseurs, il est bon de laisser une période de refroidissement de 10 minutes toutes les heures.

Débit lt/min 300b	Puissance KW
100	2,5
140	3
200	4
250	5,5
350	7,5
500	11
650	15

Le filtre d'aspiration

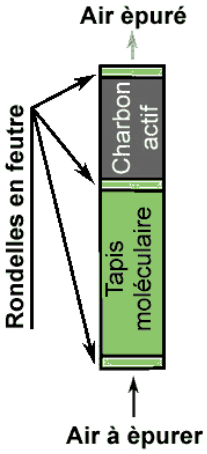
Le filtre d'aspiration permet d'éliminer les poussières présentes dans l'air aspiré par le compresseur. Ce filtre est particulièrement important pour protéger les cylindres du compresseur contre les rayures, ce sont des filtres secs en carton que l'on trouve très facilement dans l'industrie automobile.

Séparateur huile/eau



Avant de filtrer l'air il est indispensable d'éliminer au maximum les particules d'huiles et la vapeur d'eau. Le principe de cette filtration mécanique est simple, l'air chaud chargé de particules est mis en mouvement tourbillonnaire dans un cyclone. Les effets combinés de la force centrifuge et de la gravité séparent les particules d'huile de l'air. La vapeur d'eau quant à elle se condense au contact des parois froides du cyclone pour s'écouler le long de celles-ci. On obtient un effet similaire en projetant l'air chaud directement sur une paroi froide. Ce type de séparation mécanique élimine 90à 95% de l'huile et de la vapeur d'eau résiduelle. Les condensats sont recueillis à la partie inférieure de l'appareil pour être éliminés manuellement à l'aide d'un robinet ou pour les grosses unités à l'aide d'un purgeur automatique.

Filtration finale.



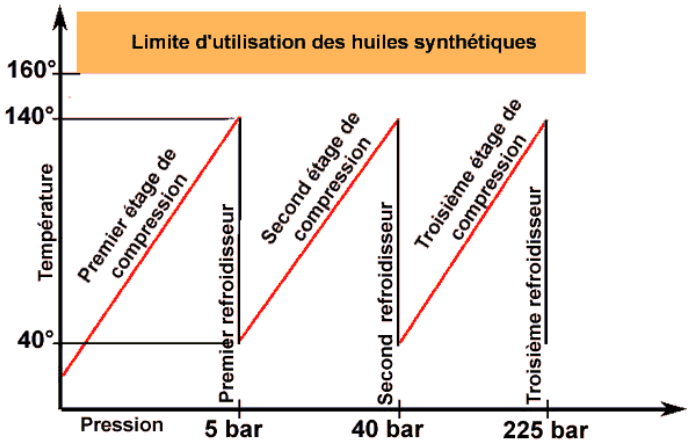
Le but de la filtration finale est d'affiner la filtration en absorbant les dernières traces d'huile et de vapeur d'eau. La cartouche filtrante se compose de deux éléments actifs : en amont un tapis moléculaire composé d'un dessicant qui se présente sous forme de petites billes blanches dont le but est d'éliminer l'humidité et en aval une couche de charbon actif pour éliminer le CO_2 et les vapeurs d'huile. Ces couches sont séparées par des rondelles en feutre ou en mousse. Les cartouches possèdent aussi un élément en bronze poreux pour retenir les particules supérieures à 5 microns. Il est très important que le tamis moléculaire se trouve en aval, en effet en présence d'humidité le charbon actif perd une partie importante de son efficacité. Les dessicants usuels sont :

- Le gel de silice (silicagel), capacité d'absorption: 120g d'eau / kg
- L' alumine activée : capacité d'absorption: 80g d'eau / kg

Le refroidissement.

Le refroidissement de l'air entre les différents étages du compresseur est une fonction des plus importantes, la vie du compresseur en dépend. En pratique la température de l'air est limitée à 140°C car au-delà les huiles se désagrègent et ne peuvent plus assurer une lubrification correcte des éléments mécaniques. Le refroidissement est assuré par un serpentin refroidi soit par de l'air pulsé par un ventilateur, soit pour les grosses unités par une circulation d'eau en circuit ouvert ou fermé. Le serpentin peut être fait en tube lisse ou en tube à ailettes. Les

tubes à ailettes ont un bien meilleur rendement que les tubes lisses.



Les Tampons.

Les tampons sont des éléments régulateurs dans une station de gonflage, ce sont des bouteilles de 50 litres reliées entres-elles et gonflées entre 250 et 300 bars. Ils permettent non seulement de limiter le nombre de démarrages horaires du compresseur, de faire face aux fluctuations de pression mais aussi et surtout de faire face à une demande d'air ponctuellement importante. Ce qui est le cas en fin de la journée de plongée ou entre les marées. La taille des tampons dépend essentiellement des facteurs suivant :

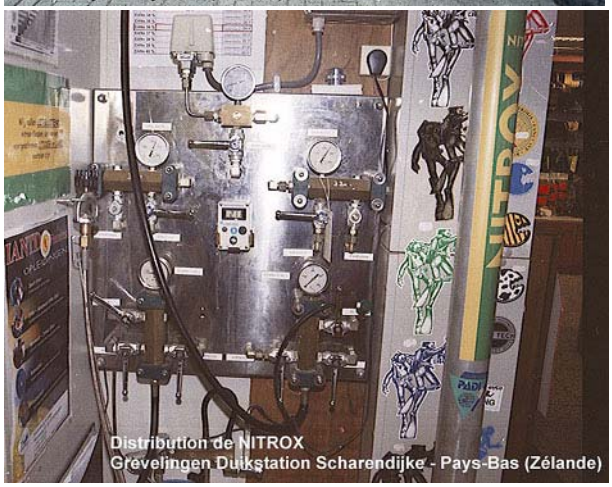
- Le débit nominal du compresseur.
- La consommation d'air moyenne et en pointe.
- La différence de pression à laquelle le pressostat doit redémarrer le compresseur, cette différence de pression est généralement de 60 bar.
- Le nombre de démarrages horaires autorisés du compresseur qui est aux maximum de 3 à 4.
- D'un facteur économique, on peut par exemple privilégier la capacité des tampons par rapport au débit nominal du compresseur pour des raisons de coût. C'est particulièrement appréciable si pour des raisons d'environnement sonore il faut utiliser des compresseurs isolés qui sont très chers.

En Belgique les tampons sont considérés comme des installations fixes et doivent de ce fait n'être rééprouvés que tous les cinq ans. Les tampons doivent, de préférence, être placés dans un local séparé avec des murs de protection et des évents pour l'expansion de l'air en cas d'incident technique.

La rampe de gonflage.

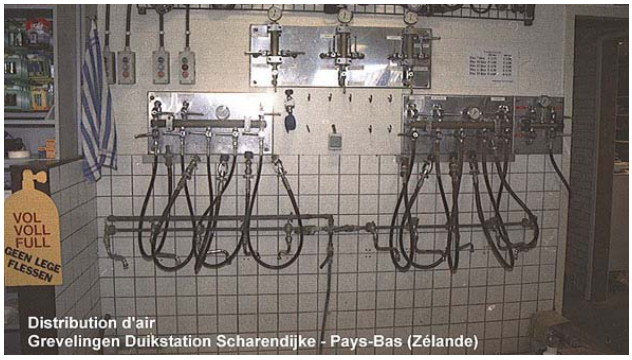
La rampe de gonflage est l'interface entre la station de gonflage et l'utilisateur. Pour un petit groupe mobile cette interface est réduite à sa plus simple expression c'est à dire un flexible de gonflage et un manomètre. Pour des groupes fixes la rampe de gonflage peut être très complexe, à partir de celle-ci on peut contrôler plusieurs circuits de pression (généralement 200 et 300 bar), plusieurs mélanges (NITROX), plusieurs flexibles de remplissage, un ou plusieurs racks de tampons. Elles est donc pourvue de tout un système de vannes, détendeurs, pressostats, manomètres, arrêts d'urgence et éventuellement un ou des analyseurs d'oxygène. Dans certains pays il y a même un bac d'eau pour gonfler les bouteilles à froid.

Station de gonflage automatique. Grevelingen Duikstation Scharendijke - Pays-Bas (Zélande)



Distribution de NITROX
Grevelingen Duikstation Scharendijke - Pays-Bas (Zélande)

Quelques exemples de rampes de gonflage et des panneaux de contrôles de ce qui se fait de mieux en la matière. C'est à dire un station permettant à la fois une distribution d'air classique, une distribution de NITROX et une station automatique.



Installation des stations de gonflage.

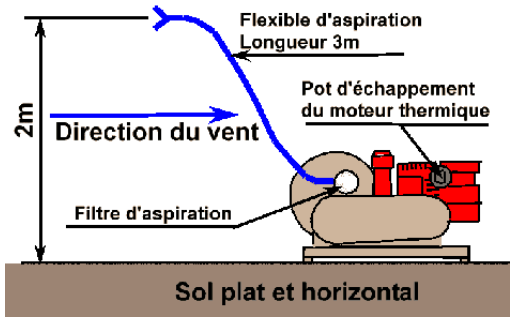
Les installations vont du plus simple au plus complexe, elles peuvent être fixes ou mobiles et même être embarquées sur une remorque.

Compresseur mobile à moteur thermique.

Il s'agit de petits compresseurs d'un débit de 80 à 150 litres / minute avec des moteurs thermiques, essence ou diesel d'une puissance de l'ordre de 4 à 6 KW. Le compresseur, le moteur, les filtres et les refroidisseurs sont montés sur un châssis unique et très compact. Le poids de l'ensemble est de l'ordre de 40 à 80 kg suivant le débit et le type de motorisation. Ce type de matériel est surtout utilisé par des plongeurs individuels, des couples ou par un groupe de maximum quatre à six plongeurs, les types de compresseurs les plus généralement utilisés sont le Coltri MCH 6 et le Bauer Junior II. Il est très important d'installer le compresseur sur un sol plat et horizontal, et dans la direction du vent de sorte que les gaz d'échappement s'éloignent de la prise d'air. Les gaz d'échappement étant plus lourds que l'air la prise d'air doit être située en hauteur (voir le dessin).

Mise en route du compresseur :

1. Ouvrez les purges des condensats et la vanne de gonflage.
2. Lancez le moteur thermique, attendez que le moteur atteingne son régime normal.
3. Fermez les purges des condensats et la vanne de gonflage.
4. Connectez la bouteille.



5. Dés que la pression atteint 150-200 bars ouvrir la vanne de gonflage et la bouteille.
6. Purgez régulièrement les condensats et vérifiez la pression.

Arrêt du compresseur :

1. Fermez le robinet de la bouteille.
2. Ouvrez les purges des condensats.
3. Coupez le moteur thermique.
4. Déconnectez la bouteille

A ne JAMAIS faire :

- **Faire tourner le compresseur dans un local totalement ou partiellement fermé**
- **Utiliser le compresseur prés d'un véhicule moteur tournant.**
- **Utiliser le compresseur près d'un feu nu ouvert à cause des gaz de combustion.**
- **Démarrer le moteur en charge.**

A TOUJOURS faire :

- **Vérifier les niveaux d'huile avant la mise en route.**
- **Surveiller le compresseur durant tout le gonflage.**
- **Surveiller la pression.**
- **Purger régulièrement les condensats.**
- **Vérifier si au cours du gonflage le vent ne change pas de sens.**
- **En fin de gonflage vérifier si l'air n'a pas une odeur d'huile.**
- **Noter les heures de fonctionnement.**

Les installations fixes.

Les installations fixes peuvent être très importantes, il n'est pas rare de trouver des centres avec plusieurs compresseurs de grand débit, des compresseurs destinés au NITROX, des surpresseurs, des dizaines de bouteilles tampons, des rampes de gonflage pouvant accueillir une dizaine de bouteilles simultanément et des automates de gonflage. Ce type d'installation peut occasionner des nuisances, sonores, vibratoires, thermiques

qu'il convient de minimiser afin de ne pas gêner le voisinage . Il faut également assurer la sécurité des opérateurs et des clients, en Belgique les dispositions sécuritaires à prendre sont décrites dans le RGPT (Règlement Général de la Protection du Travail).

Nuisances sonores

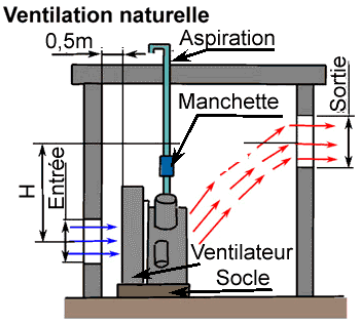
Les compresseurs sont des machines bruyantes, il faut donc les installer dans des locaux bien insonorisés et mettre tout en œuvre (flexibles, manchettes…) pour que le bruit ne se répercute pas à l'extérieur par les tuyauteries. De nombreux constructeurs proposent des machines (les séries « Silent » et « Super Silent ») isolées pouvant être placées dans des locaux pas ou peu insonorisés. Ils indiquent dans leur catalogue les valeurs de l'intensité sonore en dBA, qui est une unité de mesure exprimant un niveau d'intensité pondéré en fonction des caractéristiques physiologiques de l'oreille humaine. Cette échelle n'est pas linéaire mais logarithmique : un compresseur de 84 dBA à une intensité sonore double d'un compresseur de 83 dBA.

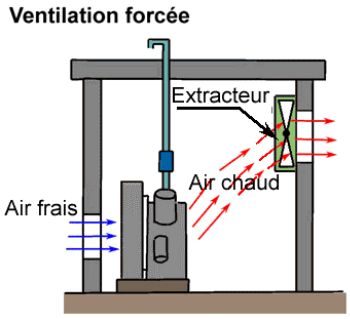
Tableau #14

- 30 dBA : niveau de bruit dans un appartement campagnard vide.
- 50 dBA : chambre à coucher en ville animée.
- 60 dBA : conversation, musique d'ambiance.
- 80 dBA : rue très animée, chaîne Hi-fi à volume moyen.
- 100 dBA : voisinage d'aérodrome
- 130 dBA : limite de tolérance de l'oreille humaine
- Coltri MCH6 Essence : 87 dBA.
- Coltri MCH6 Electrique : 83 dBA.
- Coltri MCH13: 80 dBA – MCH16 : 82dBA
- Coltri MCH13 Silent :72 dBA. – MCH16 Silent : 75 dBA
- Coltri MCH13 Super Silent : 66 dBA.
- Coltri MCH16 Super Silent : 69 dBA

Les vibrations

Les compresseurs, comme toutes les machines cycliques, produisent énormément de vibrations ; dans la mesure du possible il faut éviter que celles ci se transmettent à la

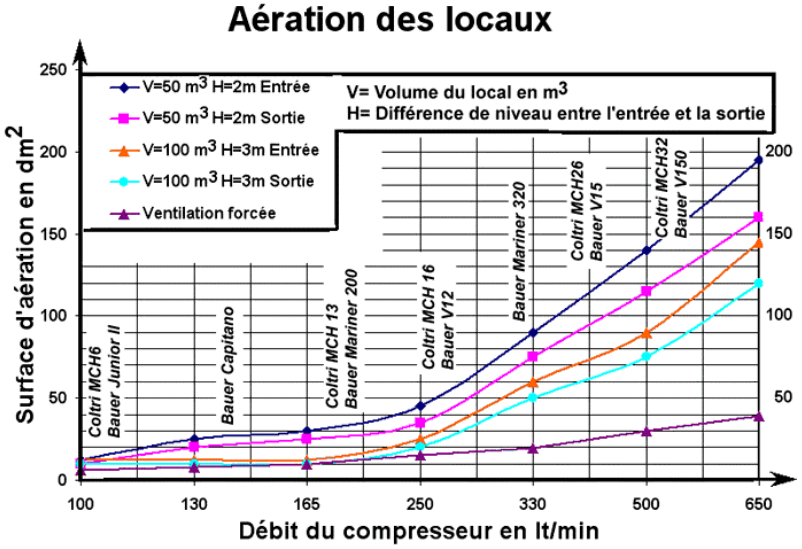




structure du bâtiment. L'idéal est de poser les compresseurs sur des socles en béton par l'intermédiaire de « Silentblocs ». Toutes les tuyauteries de pression et d'aspiration doivent être connectées au compresseur par l'intermédiaire de flexibles et de manchettes pour éviter de transmettre les vibrations par l'intermédiaire des tuyauteries.

Evacuation de la chaleur

Les compresseurs dissipent en moyenne 350 watts/heure par mètre cube d'air comprimé à 300 bar. Pour un bon fonctionnement la température dans le local ne peut pas dépasser les 45°C. Il est donc obligatoire de ventiler le local, cette ventilation peut être naturelle ou forcée par un extracteur. Le diagramme donne les dimensions minimales des aérations en fonction du volume du local, de la différence de niveau des aérations et du débit des compresseurs.

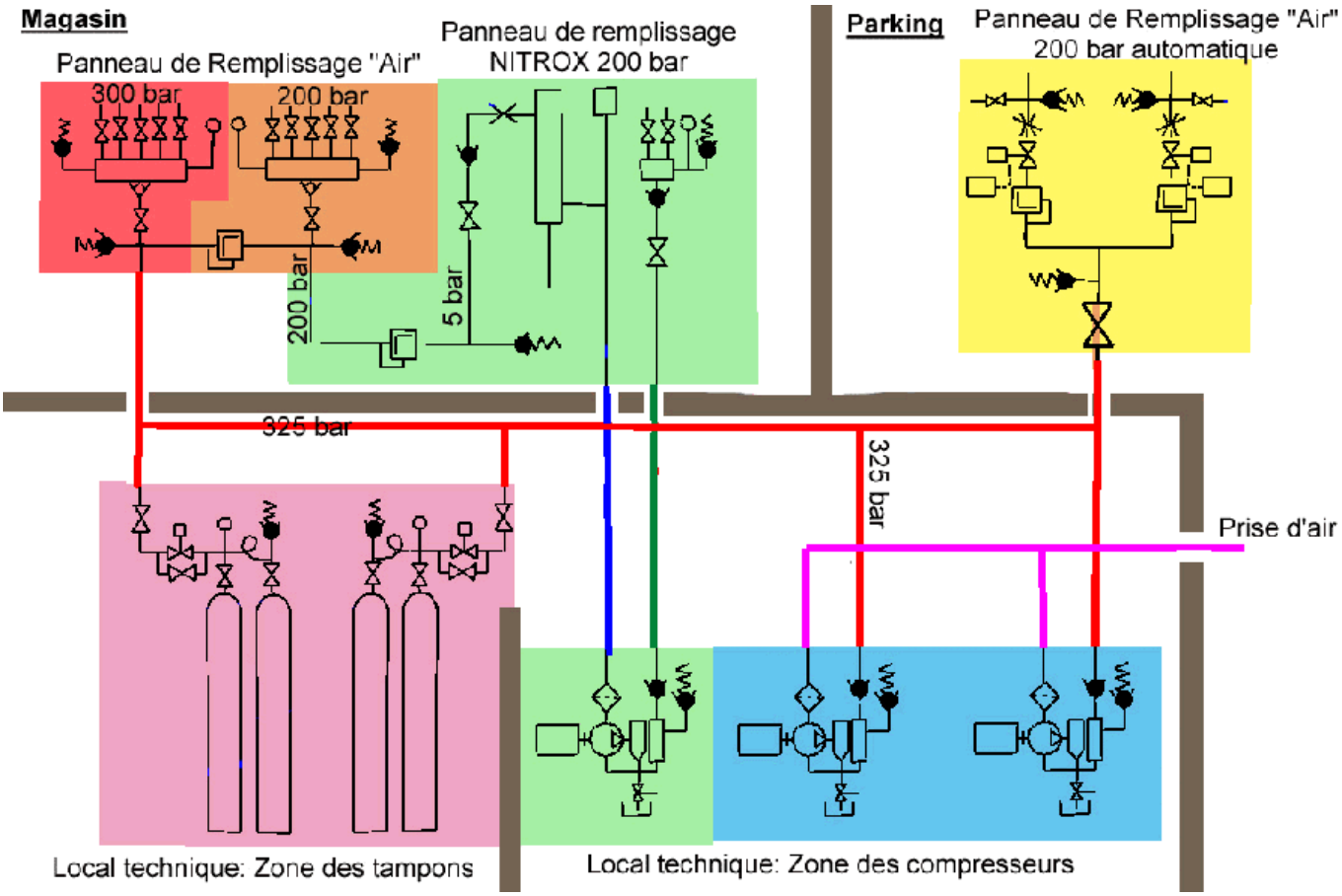


Les locaux

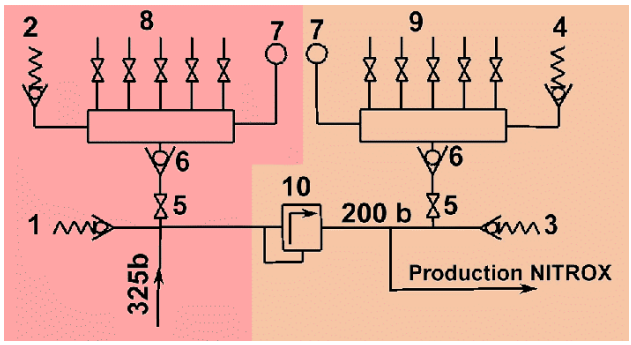
Les locaux doivent être propres, secs, hors du gel et le sol doit être horizontal. Les compresseurs doivent être placés à au moins 50 cm des murs pour assurer une bonne ventilation. Les prises d'air doivent être conduites à l'extérieur du bâtiment et placées en hauteur pour éviter d'aspirer les gaz d'échappement de la circulation automobile. De préférence placer les tampons dans un local technique séparé de la salle des compresseurs, cette pièce doit être munie d'auvents permettant la détente de l'air sans danger en cas d'incident sur un des tampons.

Schéma d'une installation

Le schéma suivant est un exemple didactique d'un centre de gonflage moderne qui permet de gonfler des bouteilles d'air, 200 ou 300 bars, du NITROX à 200 bars et une station automatique qui permet de gonfler hors des périodes d'ouverture. Ce dessin à été inspiré par l'installation du « Grevelingen Duikstation » en Zélande (Pays-Bas).

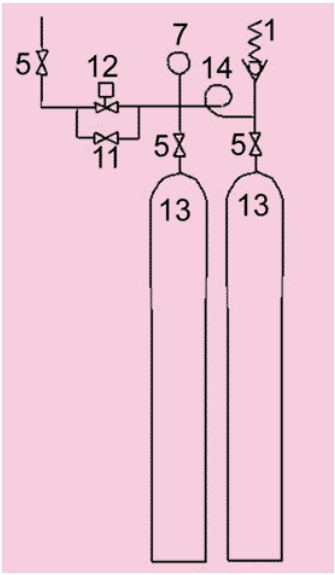


Rampe de Gonflage air.



1.Soupape de sûreté 350 bar
2.Soupape de sûreté 325 bar
3.Soupape de sûreté 250 bar
4.Soupape de sûreté 225 bar
5.Vanne d'isolation
6.Clapet anti-retour.
7.Manomètre
8.Rampe de 300 bar /air
9.Rampe de 200 bar /air
10. Détendeur 325/225 bar

Les racks de tampons

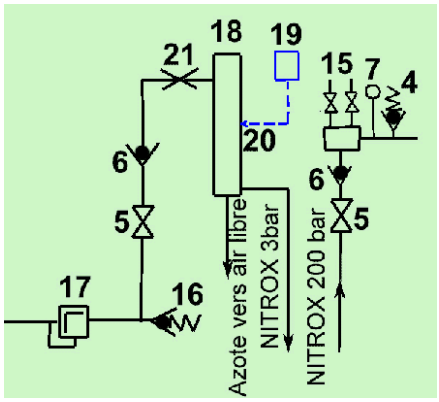


d'oxygène dans le mélange.

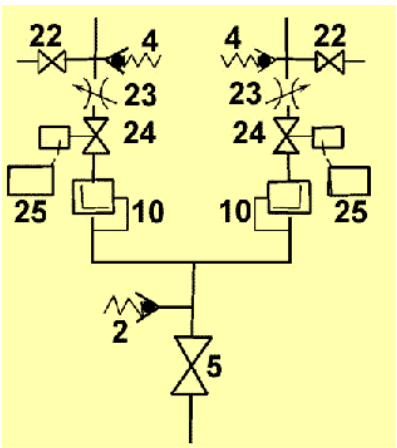
11. Vanne de By-pass : cette vanne double les électrovannes pour permettre une utilisation manuelle de l'installation.
12. Electrovanne qui permet d' utiliser les tampons ou de les gonfler à partir d 'une commande sur la rampe de gonflage.
13. Tampon B50.
14. Lyre de connexion entre les bouteilles tampons.

Rampe de gonflage NITROX

15.Rampe NITROX, Maximum 36% d' oxygène.
16. Soupape de sûreté 7 bar
17.Détendeur 225/7 bar
18.Filtration DNAx
19.Mesure du % d'oxygène
20. Sonde de mesure du %d' oxygène
21.Vanne de laminage qui permet de contrôler le %



Rampe de gonflage automatique.



Cette technique relativement nouvelle à été développée en Zélande pour permettre aux plongeurs de gonfler leurs bouteilles en dehors des heures normales des magasins (la plupart des plongées se font suivant les étales de marées). Ce gonflage ne se trouve pas sur la voie publique, mais sur des terrains privés accessibles aux public comme des guichets de banque.

22. Vanne de décharge, qui permet de déconnecter le flexible après le gonflage.
23. Düse (gicleur réglable) qui permet de régler le débit et donc de déterminer la quantité d'air par unité monétaire.
24.Electrovanne d'ouverture/fermeture de la ligne de gonflage, cette vanne est pilotée via le monnayeur
25. Monnayeur

Les compresseurs compacts « Silent » et « Super Silent »

Ce sont des unités très compactes comprenant compresseur, moteur, filtres, rampe de gonflage montés dans une caisse insonorisée. Ce matériel a été spécifiquement développé pour les petits magasins citadins ne disposant ni d'une grande superficie ni d'un local spécifique pour le gonflage. Leur insonorisation est telle qu'ils peuvent être placés dans une pièce de rez-de-chaussée sans déranger les voisins du premier étage.

Entretien

Le tableau d'entretien donné ci-après n'est donné qu'a titre informatif, il faut se référer au manuel d'entretien de votre compresseur pour plus de détails concernant les périodicités des entretiens, le type d'huile (viscosité en fonction de la température), la quantité d'huile, les types de filtres... Le tableau est donné pour un compresseur personnel de 6 m3/heure avec un entraînement électrique.
Dans l'estimation des coûts il n'est pas tenu compte de la main d'œuvre, on suppose que les entretiens peuvent être faits par le propriétaire.

Tableau #15	**Périodicité :**	**Quantité**	**Coût en euros**
Première vidange	25 heures	1,5 litres	15
Vidange	250 heures	1,5 litres	15
Nettoyage du filtre d'aspiration (1)	150 m3	0	0
Remplacement du filtre d'aspiration (2)	450 m3	1	15
Nettoyage du filtre intermédiaire	800 heures	0	0
Reconditionnement du filtre final (3) (une cartouche neuve vaut~30 euros)	100 m3	+/-0,1 litre de charbon actif +/-0,1 litre de tamis moléculaire 3 feutrines	3 (cartouche recyclée)

Si l'on fait les entretiens soi même le coût est estimé à 0,1 à 0,35 euros par m^3 si on reconditionne ou pas la cartouche de filtre.
(1) Diviser cette période par trois si l'atmosphère est très poussiéreuse.
(2) Tourner le filtre de 90° à chaque nettoyage.
(3) On considère que la cartouche est reconditionné avec du charbon actif, du tamis moléculaire et des feutrines neuves et que l'on récupère le corps de la cartouche Pour la fabrication du NITROX, il vaut mieux diviser la périodicité par deux.

Frais de fonctionnement et d' amortissement *Tableau #16 et #17*

Le tableau ci dessous donne une estimation des coûts d'un compresseur personnel de 6m3 /heure électrique en tenant compte d'une durée d'amortissement de 5 ans, d'une valeur de revente égale à 40% du prix d'achat, d'un taux de charge financier de 5% annuel. En 2004 le prix d'achat d'un Coltri était de l'ordre de 2200 euros et d'un Bauer de 3000 euros, considérons un prix d'achat moyen de 2600 euros.

Bouteilles/an 15 litres	***Cubage m3/an***	***Prix €/m3***	***Prix €/bouteille***
40	100	4,9	12
50	125	4,0	10
60	150	3,3	8
70	175	2,9	7
80	200	2,6	6,5
100	250	2,2	5,5
150	375	1,5	4,0
250	675	1,0	2,5
350	875	0,8	2,0

Le prix de l'énergie en Belgique est de 0.2 euros par KWH. Le prix des gonflages est basé sur une bouteille de 15 litres contenant encore 500 litres d'air au moment du gonflage En conclusion, même si le centre de gonflage se trouve en face de votre domicile l'achat d'un compresseur devient financièrement intéressant si vous gonflez plus de 100 bouteilles par an. D'autre part si vous n'avez pas de compresseur il faudra tenir compte dans le coût du gonflage de vos frais de déplacement

Tableau d'amortissement	
Prix d'achat	2600 euros
Amortissement	700 euros
Revente	1000 euros
Total	2300 euros
Amortissement annuel	460 euros
Entretien	0,1 euro/m3
Energie	0,2 euro/m3

Logbook du compresseur

Très utile pour les compresseurs qui n'ont pas de compteur horaire, il évite d'oublier des entretiens. Les fréquences de remplacement des pièces d'usures étant très différentes il y a intérêt à créer une colonne de temps cumulé et/ou de volume cumulé par élément. Il est aussi intéressant de noter dans ce carnet les temps d'utilisation des surfiltres, bien qu'ils ne fassent pas vraiment partie du compresseur. Indiquer aussi sur la page de garde les adresses utiles et un pense bête avec la fréquence des entretiens.

Exemple de logbook

Date	**Durée heures**	**m3**	**Durées cumulées avant remplacement**								**Remarques**
			Heure	**m3**	**Compresseur/Filtres**				**Moteur**	**Surfiltre**	
					Vidang	*Aspirat*	*Interméd*	*Final*			
04/3	1	5	500	2500	245	145	500	45	200	45	
05/3	1	5	501	2505	**0**	**0**	501	50	201	50	vidange/aspiration
06/3	1	5	502	2510	1	5	502	55	202	55	

Chapitre 5

Fabrication des gaz Remplissage des bouteilles

Niveau :

Spécialité Gaz Blending
Divemaster
Instructeur

Avertissement

La fabrication du NITROX nécessite l'utilisation d'oxygène pur. Son utilisation peut présenter des risques d'explosion ou d'incendie et ne peut se faire que par des personnes bien formées et conscientes des risques inhérents à son utilisation.

A ne JAMAIS faire :

- Utiliser des graisses non prévues pour l' oxygène pur (si c'est possible il vaut mieux ne pas utiliser de graisse).
- Fumer ou avoir un feu à flammes non couvertes a proximité de l'oxygène.
- Ne jamais faire passer un gaz contenant plus de 36% d'oxygène dans un compresseur à pistons
- Ne jamais ouvrir les vannes ou robinets brutalement
- Ne jamais utiliser un matériel de fabrication ou de transfert non dégraissé.

A TOUJOURS faire :

- Utiliser un matériel de fabrication et de transfert parfaitement dégraissé.
- Dégraisser régulièrement le matériel de fabrication et de transfert.
- Avoir une installation propre dans un local propre hors poussières (toutes les poussières peuvent exploser dans un courant d'oxygène pur)
- Toujours ouvrir les vannes et robinets progressivement (éviter les vannes à boules)
- Veillez à ce que personne ne fume ou n' allume une flamme à proximité.
- Pour le passage dans un compresseur vérifiez que le pourcentage d'oxygène est de maximum 36% et que le mélange est bien homogène.

© Jean-Claude Taymans

Les méthodes de fabrication du Nitrox.

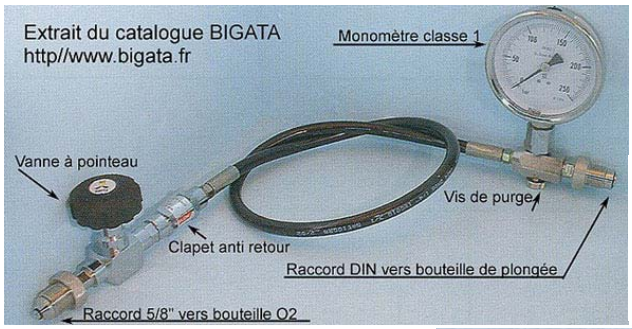
Il existe plusieurs façons de fabriquer du Nitrox, toutes les méthodes présentent des avantages et des désavantages. Les six méthodes les plus utilisées sont :

- Méthode de la double filtration ou des pressions partielles.
- Méthode automatisée de la double filtration ou des pressions partielles.
- Fabrication continue au stick
- Séparation moléculaire ou filtration semi-perméable DNAx.
- Méthode des masses moléculaires
- Utilisation de Nitrox préfabriqué.

Quelle que soit la méthode de fabrication il est impératif de vérifier au niveau de la bouteille de plongée le % d'oxygène réel du mélange à l'aide d'un oxymètre !

Méthode de la double filtration ou des pressions partielles

C'est la méthode la plus couramment utilisée par les particuliers, les « Tekies » et les « Spéléos » elle présente l'avantage de ne mettre en œuvre que peu de matériel, une lyre de transfert pour oxygène et un surfiltre suffisent.



Le surfiltre est obligatoire pour limiter la quantité d'huile résiduelle à 0,1 mg/m3 qui est la valeur la plus généralement admisse pour la fabrication du NITROX. Pour avoir une précision suffisante le manomètre de la lyre de transfert doit au minimum être de la classe 1 c'est à dire que sur toute l'échelle de mesure la précision doit être au minimum de 1%. Le manomètre électronique présente l'avantage d'être très précis et d'avoir une lecture très aisée mais est d'un prix prohibitif. Certaines législations prévoient un clapet anti retour sur la lyre pour éviter de transférer accidentellement du Nitrox dans la bouteille d'oxygène pur.

Il est possible de fabriquer n'importe quel NITROX même ceux qui sont fortement suroxygénés. Les inconvénients majeurs de la méthode sont :

- Impossibilité de vider complètement la bouteille d'oxygène.
- La fabrication se fait à pression élevée ce qui augmente le risque de combustion spontanée.
- L'injection d'oxygène pur se fait directement dans la bouteille de plongée qui doit être parfaitement dégraissée, pratiquement cela interdit la fabrication pour une tierce personne dont on n'est pas sûr de la qualité de la bouteille.
- Il faut attendre quelques heures avant d'utiliser le NITROX ainsi fabriqué pour être sûr que le mélange est homogène.
- Sans être réellement complexe, le calcul des différentes pressions de remplissage par la loi de Dalton peut rebuter.

Malgré les inconvénients et les dangers, cette méthode, très économique, est très prisée par les particuliers.

Méthode de calcul.

(12) et (12-1)

$$PO_2 = \frac{\left[\frac{(P \times \%O_2)-(P_{ini} \times \%O_{2ini})}{(P-P_{ini})} - 21\right]}{79} \times (P-P_{ini})$$

$$P_{mano} = P_{ini} + PO_2$$

- PO_2 est la pression d'oxygène à ajouter.
- P est la pression finale à obtenir.
- P_{ini} est la pression initiale mesurée avant remplissage.
- $\%O_2$ est le % d'oxygène que l'on désire obtenir.
- $\%O_{2ini}$ est le % d'oxygène initial avant remplissage mesuré à l'oxymètre.
- Pmano est la pression à lire sur le manomètre après l'apport en oxygène

A l'aide des relations (12) et (12-1) on peut construire des tableaux de remplissage, qui indiquent la pression à lire sur le manomètre en fonction du type de mélange et de la pression initiale (PB) dans la bouteille.

P= 200 bar %O_2=36 %O_2 ini=36					
PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano
1	37,78	38,78	51	28,29	79,29
2	37,59	39,59	52	28,10	80,10
3	37,41	40,41	53	27,91	80,91
4	37,22	41,22	54	27,72	81,72

En appendice vous trouverez les tableaux complets pour les mélanges standards (Nx32 et Nx36)

Exemple #15
Questions:
a)Quelle est la pression d'O_2 qu'il faut ajouter a une bouteille contenant un NITROX 32 à 90 bar pour fabriquer un NITROX 36 à 200 bar ?
b)Quelle doit être la pression lue sur le manomètre de précision après l'ajout de l'O_2?
c)Quelle doit être la pression lue sur le manomètre de précision après l'appoint d'air ?

Solutions:
Réponse à la question a

P=200 bars *P_{ini}=90 bar*
%O2=36 *$\%O2_{ini}$=32*

Réponse à la question b
Il faut lire sur le manomètre:
P_{mano} =90+25,4= 115,4 bar

Réponse à la question c
Il faut lire sur le manomètre 200 bar.

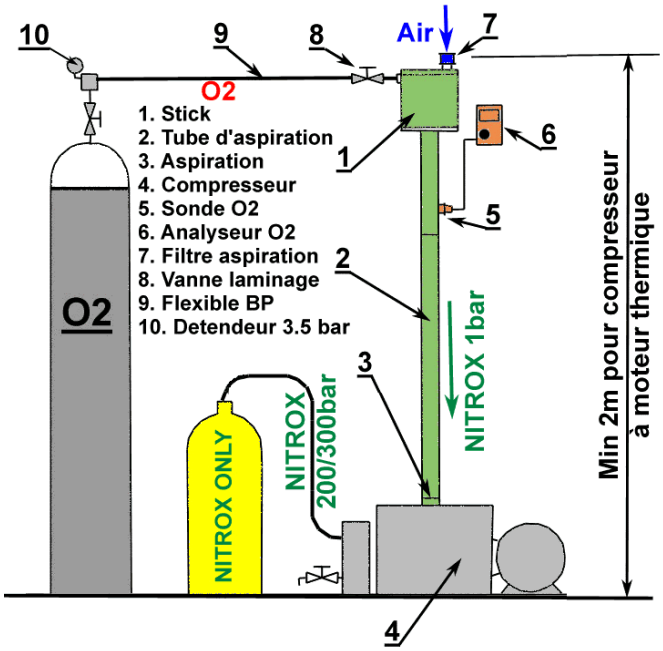
Méthode de remplissage

1. Mesurer à l'aide de l'oxymètre le % d'oxygène dans la bouteille.
2. Mesurer la pression dans la bouteille (Pini), vérifier avant de connecter la propreté de tous les raccords.
3. Calculer l'appoint d'oxygène en fonction de la pression finale à obtenir et le type de Nitrox désiré.
4. Faire l'appoint en oxygène en ouvrant délicatement la vanne à pointeau de la lyre et en surveillant le manomètre.
5. Déconnecter la lyre, connecter le surfiltre et le compresseur et faire l'appoint en air.
6. Laisser reposer la bouteille quelques heures.
7. Mesurer le % d' oxygène réel dans la bouteille et marquer celle-ci (ajuster les paramètres de plongée en fonction de cette teneur).

Méthode des pressions partielles automatisées

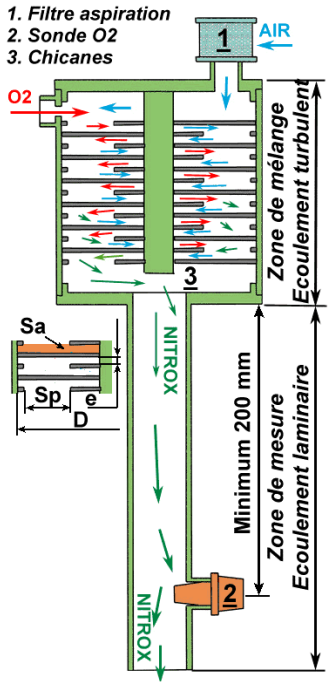
Cette méthode dans le principe est la même que pour la fabrication par pressions partielles mais a l'avantage d'être complètement automatisée. Elle a donc tous les avantages et inconvénients de cette méthode à l'exclusion des risques liés aux erreurs humaines. Les mesures, calculs et remplissage sont entièrement contrôlés par l'automate programmable L'opérateur n'a plus qu'à entrer via un clavier numérique le mélange désiré, la machine se charge du reste. Les premiers systèmes furent mis en service aux USA en 1996 par NS Research qui reste encore de nos jours une référence en la matière. L'investissement pour ce type de matériel est très important, seuls des centres importants peuvent s' offrir ce matériel de pointe.

Fabrication en continu au stick (mélangeur)

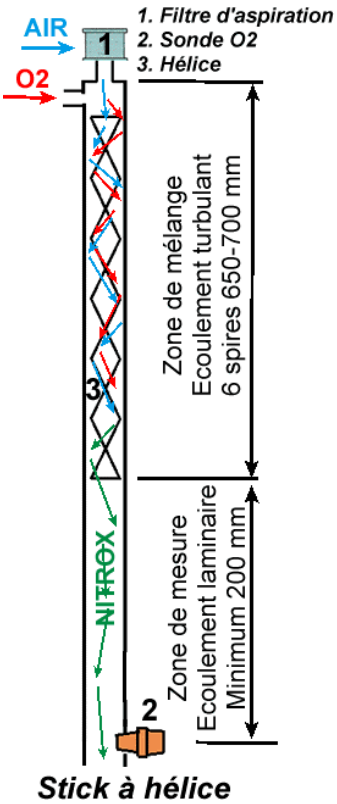


Stick, le terme magique des « Tekies » qui fait « frémir » d'indignation mais surtout d'incompréhension les « monos » de l'ancienne génération alors que c'est si simple. Le stick n'est jamais, comme son nom l'indique, q'une canne qui permet d'assurer un mélange homogène d'air et d'oxygène pour fabriquer un NITROX à la pression atmosphérique. Le stick n'est donc qu'un

simple mélangeur, le mélange peut se faire dans une boite à chicanes, par l'intermédiaire d'une hélice ou même en utilisant les propriétés cycloniques des décanteurs
(Principe utilisé par Gérard Cordonnier).
Le compresseur étant une machine cyclique (flux pulsé) et le débit d'oxygène continu, pour éviter d'envoyer une rasade d'oxygène dans les cylindres du compresseur (peu de chance qu'il apprécie) il faut éloigner l'injection d'oxygène du compresseur, la colonne d'air servant ainsi d'amortisseur. En fait un autre avantage du stick est qu'il permet d' allonger artificiellement la colonne d'amortissement. Le Stick est composé de deux zones, une zone turbulente où l'air et l'oxygène sont mixés et une zone laminaire pour faciliter la mesure du pourcentage d'oxygène. Pour qu'un stick à hélice soit efficace il faut avoir au minimum cinq à six spirales sur une longueur de l'ordre de 700 à 800mm dans un tube DN32 (Débit 6 à 12 m3/hr). Le stick à chicane est nettement plus compact en longueur mais pas en diamètre ; pour qu'il soit efficace il faut au moins une dizaine de chicanes. Pour un débit entre 6 et 12 m3/hr les sections annulaires (Sa) et les sections de passage (Sp) doivent être de l'ordre de 350 mm2 ce qui pour un diamètre D=100 induit une distance (e) entre chicanes de 5 à 6 mm.
Le danger le plus important dans l'utilisation du Stick est de laisser par distraction la vanne de laminage ouverte à fond et d' ouvrir brutalement la vanne de la bouteille d'oxygène. On peut limiter le risque d'incendie en plaçant en aval de la vanne de laminage un gicleur calibré (en fonction de la pression et du débit d'O2) pour ne laisser passer q'une quantité d'oxygène rendant impossible la fabrication d'un mélange à plus de 40% d'oxygène.
Les vannes d'isolation, de laminage, le détendeur, les tuyauteries en aval du Stick doivent bien sûr être compatibles pour l'oxygène. Le diagramme ci dessous donne les débits d'oxygène en fonction du débit du compresseur et du mélange que l'on désire obtenir. Celui-ci ne sert qu'à calibrer les éléments de l'installation et pas à régler la richesse du mélange, cela ne peut se faire qu'avec l'analyseur d'O2. Le principal inconvénient du stick est qu'il est impossible de fabriquer un mélange contenant plus de 36% d'oxygène et qu'il faut être particulièrement précautionneux dans l'utilisation mais les avantages sont particulièrement nombreux.



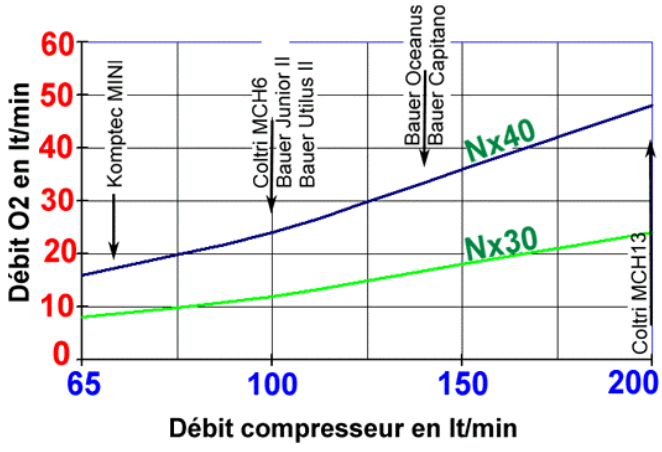
Stick à chicanes



Stick à hélice

Avantages

- Pas de filtre supplémentaire.
- Facile à déplacer.
- Convient aux installations mobiles
- Procédé très peu coûteux.
- Convient à tous les types de compresseur.
- Procédé très précis.
- Matériel peu coûteux, de faible encombrement et facile à installer.
- Possibilité de vider entièrement les bouteilles d'oxygène.
- Convient parfaitement aux petites installations.
- Procédé statique qui ne nécessite aucun entretien.
- Mélange directement homogène, on peut donc utiliser la bouteille immédiatement.



Procédure de remplissage

1. Vérifier si toutes les vannes du circuit d'oxygène sont fermées.
2. Vérifier le calibrage de l'analyseur O2 (20,9%).
3. Démarrer le compresseur.
4. Vérifier si l'analyse d'O2 reste stable.
5. Ouvrir doucement la bouteille d'oxygène.
6. Ouvrir **TRES** délicatement la vanne de laminage en surveillant l'analyseur d'O2, Dés qu'on est proche du %O2 désiré attendre 10-20 secs pour voir si la mesure reste stable , puis ajuster la valeur en **actionnant la vanne de laminage encore plus délicatement.**
7. Connecter la bouteille.
8. Vérifier régulièrement la stabilité de la mesure, ajuster au besoin et ne pas oublier de purger régulièrement le compresseur.
9. Dés que la bouteille est remplie, déconnecter celle-ci.
10. Fermer la vanne de laminage
11. Fermer la bouteille d'oxygène
12. Faire tourner le compresseur à vide au moins 30 sec pour vider toute l'installation du mélange, puis couper le compresseur.

A ne JAMAIS faire :

- Tenter de fabriquer un mélange contenant plus de 40% d'O2 .
- Laisser l'installation sans surveillance et principalement l'analyseur.
- Gonfler une bouteille air en NITROX.
- Utiliser un compresseur mal entretenu.

A TOUJOURS faire :

- Vérifier que toutes les vannes d'oxygènes sont fermées avant de lancer le compresseur.
- Se limiter à un Nx36 au maximum.
- Analyser le mélange directement sur la bouteille.
- Marquer la bouteille avec le type de mélange, la date, la profondeur maximum d'utilisation en fonction de la ppO2 (1.4)
- Remplir le carnet de gonflage.
- Remplir le « logbook du compresseur » (très utile pour les entretiens)

Le développement des sticks doit beaucoup aux plongeurs « TEK » et « Spéléo » qui ont toujours cherché des moyens efficaces, bon marché, faciles à mettre en œuvre pour fabriquer leurs gaz intermédiaires et de déco en vidant complètement les B50[14] d'O2. On peut citer :

Jacques Vettier: Plongeur TEK français auteur du livre NITROX-TRIMIX.
Gérard Cordonnier: Responsable mélanges dans une station de gonflage au Grand-duché de Luxembourg. Adaptation de décanteurs pour la fabrication de stick
Jean-Pierre Stefanato : Plongeur spéléo français et sa « Nitrouillette » qui est un stick à chicanes très original et particulièrement compact.
Patrick Chene: Plongeur spéléo français qui à eu l'idée de fabriquer un stick très simple et bon marché pour petits débits en remplaçant l'hélice par des « chips » d'emballage.
Bernard Murisier: (b.murisier@bluewin.ch) Ingénieur et plongeur spéléo Suisse qui développe et commercialise des sticks de très grande qualité.

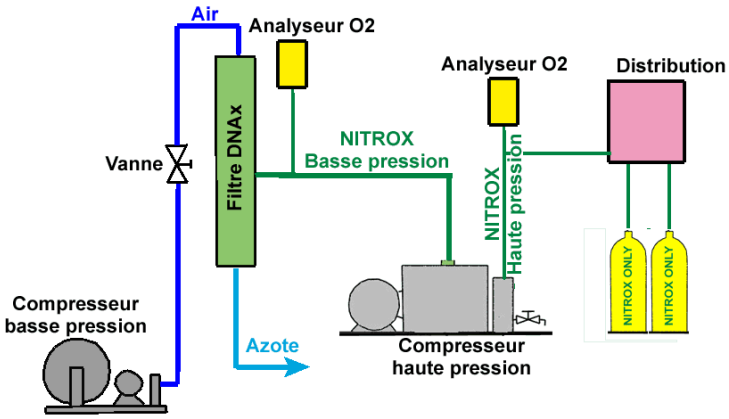
Un site à ne pas manquer :
http://www.plongeesout.com/

Séparation moléculaire ou filtration semi-perméable DNAx.

L'air est envoyé à partir d'un compresseur basse pression (10 bar) au travers d'un filtre de fibres (Hollow fiber) qui a la particularité de séparer l'azote de l'air, le produit résiduel de cette filtration est un air enrichi. Le % d'O_2 est fonction de la pression de l'air et du réglage du débit d'échappement de l'azote. Avec une double boucle de régulation, il est possible de fabriquer deux qualités de NITROX. Par la suite ce NITROX est comprimé jusqu'à 200 bars. Par cette méthode il n'est pas possible d'obtenir un mélange supérieur à 40 %O_2. C'est le moyen le plus sûr pour fabriquer le NITROX mais aussi le plus cher en investissement et en énergie. Il faut 2 compresseurs et le débit massique du compresseur basse pression doit être trois plus important que le débit massique du compresseur haute pression. Ce système rejette de l'azote, il faut donc une évacuation vers l'extérieur du local si on ne veut pas risquer l'hypoxie.

14 B50 capacité des bouteilles d'oxygène, d' argon et d'hélium. 50 représente le volume hydraulique. C'est le conditionnement le plus fréquent.

Ce système présente tous les avantages et inconvénients de la fabrication au stick mais a les avantages de ne pas avoir besoin d'une source d'oxygène indépendante, de ne pas utiliser de l'oxygène pur sous haute pression dans le processus de fabrication et d'être très automatisé . De ce fait il peut être utilisé par un personnel moins formé Par contre il a deux défauts de taille: Le processus de fabrication demande énormément d'énergie, le coût de l'installation est très important. Le prix de revient du NITROX ainsi fabriqué est



relativement élevé, la méthode ne convient qu'aux grands centres pouvant amortir sur la quantité le prix de l'installation.

Méthode des masses moléculaires

Cette méthode est basée sur la masse de chaque gaz. Elle est particulièrement précise surtout pour un grand volume, l'imprécision due a la force exercée sur la balance par le flexible de gonflage et l'effet dynamique du gaz en circulation devenant négligeable. Cette méthode est utilisée industriellement pour fabriquer des mélanges très précis à partir de gaz pur et dans des bouteilles préalablement vidées[15]. La méthode nécessite l'utilisation d'une balance digitale très précise et d'un environnement exempt d'éléments perturbateurs pouvant influencer la mesure. Cette méthode nécessitant un investissement important est peu utilisée dans les centres de gonflage, elle est principalement utilisée pour préfabriquer des mélanges qui seront par la suite « boostés » dans les bouteilles de plongée. Néanmoins l'imprécision aux hautes pressions de la loi de Boyle Mariotte (surtout pour l'hélium) et la complexité de l'équation d'état de Van der Waals[16] incitent de plus en plus les gonfleurs à utiliser cette méthode. Les « blender's » américains très a cheval sur la précision commence à l'adopter largement.

Petit rappel physique

La masse moléculaire s'exprime généralement en kg/kmole[17] ou en gramme/mole dans des conditions normales (température 0°C et pression atmosphérique normale de 760mm de mercure) une mole de gaz occupe un volume de 22,4135 litre. L'avantage de travailler avec des masses moléculaires est que la masse d'une mole de gaz est constante, même si le volume occupé par cette mole varie en fonction de la pression et de la température du gaz.

Gaz	g/mole
Hydrogène (H_2)	2,016
Hélium (He)	4,002
Azote (N_2)	28,016
Oxygène (O_2)	32,000
Air sec	28,850

Calcul des masses

Hypothèse : Le rack de bouteilles de plongée contient un reliquat de mélange dont on connaît la pression P_1 la température t_1, et les proportions $[O_2]_1$, $[He]_1$, $[N_2]_1$ respectivement les pourcentages d'oxygène, d'hélium et d'azote ainsi que la contenance V des bouteilles . Nous devons obtenir un volume de mélange V_2 qui sera à la pression P_2 et à la température t_2 dans le rack de bouteilles et ce mélange doit contenir les proportions suivantes: $[O_2]_2$, $[He]_2$, $[N_2]_2$ respectivement les pourcentages d'oxygène, d'hélium et d'azote à obtenir.

Calculs préliminaires.

$T_1 = t_1 + 273,15$ $T_2 = t_2 + 273,15$ (13)

Nombre de moles (mol) du reliquat $=\{moles\}_1$

$V_1 = V \times P_1 \times 273,15 / T_1$ (14)

$\{mol\}_1 = V_1 / 22,4135$ (14-1)

15 Dans l'industrie les bouteilles sont effectivement vidées. Ce n'est pas le cas des centres de plongée ou on ne gaspille pas le gaz

16 L'équation d'état de VdW est plus sophistiquée que la loi des gaz parfaits. Pour plus d'explications regardez l'appendice APP-2

17 mole : Molécule-gramme unité de masse usuelle en chimie.

Calculs.

a) Déterminons la quantité de gaz dans la bouteille, nous connaissons le volume hydraulique V_{hyd} des bouteilles et nous considérons une pression P inférieure de 5 à 10 % à la pression nominale des bouteilles pour éviter de dépasser cette pression lors du remplissage (les calculs sont fait à une température de 0°C).

$$V_2 = V_{hyd} \times P \qquad (15)$$

et le nombre de moles correspondant sera de :

$$\{mol\}_2 = V_2 / 22{,}4135 \qquad (15\text{-}1)$$

b) Les masses molaires (en grammes) du reliquat de gaz et du gaz final peuvent s'écrire

$\{masse\ molaire\}_1 = ([He]_1 \times 4{,}002) + ([O_2]_1 \times 32) + ([N_2]_1 \times 28{,}016)$

$\{masse\ molaire\}_2 = ([He]_2 \times 4{,}002) + ([O_2]_2 \times 32) + ([N_2]_2 \times 28{,}016)$

(16) et (16-1)

Ce qui signifie q'une mole de gaz final doit contenir :($[He]_2$ x 4,002) grammes d'hélium, ($[O_2]_2$ x 32) grammes d'oxygène et ($[N_2]_2$ x 28,016) grammes d'azote. Et qu'une mole de reliquat de gaz contient : :($[He]_1$ x 4,002) grammes d'hélium, ($[O_2]_1$ x 32) grammes d'oxygène et ($[N_2]_1$ x 28,016) grammes d'azote. Comme nous connaissons le nombre initial et final de moles à obtenir on déduit des relations (16) :

Pour le mélange final :

$\{Mas\ He\}_{final} = ([He]_2 \times 4{,}002) \times \{mol\}_2$

$\{Mas\ O2\}_{final} = ([O_2]_2 \times 32) \times \{mol\}_2$

$\{Mas\ N2\}_{final} = ([N_2]_2 \times 28{,}016) \times \{mol\}_2$

(17), (17-1) et (17-2)

Pour le reliquat :

$\{Mas\ He\}_{reli} = ([He]_1 \times 4{,}002) \times \{mol\}_1$

$\{Mas\ O2\}_{reli} = ([O_2]_1 \times 32) \times \{mol\}_1$

$\{Mas\ N2\}_{reli} = ([N_2]_1 \times 28{,}016) \times \{mol\}_1$

(18), (18-1) et (18-2)

c) Les masses (Mas) de gaz à rajouter sont déduites à partir des relations (17) et (18) :

$\{Mas\ He\}_{pur} = \{Mas\ He\}_{final} - \{Mas\ He\}_{reli}$

$\{Mas\ O2\}_{pur} = \{Mas\ O2\}_{final} - \{Mas\ O2\}_{reli}$

$\{Mas\ N2\}_{pur} = \{Mas\ N2\}_{final} - \{Mas\ N2\}_{reli}$

(19), (19-1) et (19-2)

d) Comme une mole d'air (28,85 grammes) contient 22,13 gramme d'azote et 6,72 gramme d'oxygène une simple règle de trois suffit à déterminer la masse d'air à injecter et la masse d'oxygène contenue dans cette quantité d'air. On en déduit les (20), (20-1)

$\{Mas\ air\} = \{Mas\ N2\}_{pur} \times 28{,}85/22{,}13$

$\{Mas\ O2\}_{air} = \{Mas\ air\} \times 6{,}72/28{,}85$

Utiliser de l'air engendre de l'imprécision car les calculs ne tiennent pas compte de la masse des gaz rares et de la vapeur d'eau.

e) Finalement si on utilise de l'air à la place d'azote pur les masses de gaz à rajouter sont :

$\{Mas\ He\} = \{Mas\ He\}_{pur}$

$\{Mas\ O2\} = \{Mas\ O2\}_{pur} - \{Mas\ O2\}_{air}$

$\{Mas\ air\} = \{Mas\ N2\}_{pur} \times 28{,}85/22{,}13$

(21), (21-1) et (21-2)

f) Il reste à vérifier si la pression dans la bouteille n'est pas trop forte.

$P_2 = (1\ bar \times V_2 \times T_2) / (273{,}15 \times V_{hyd})$ (22)

Ce raisonnement est valable pour 2,3,4…n gaz purs. Les formules sont facilement adaptables.

Exemple numérique #16

Questions
a) Quel est la masse moléculaire d'un Tx 18/40 ?
b) Dans des conditions normale quel est le volume occupé par cette quantité de gaz ?
c) Quelle est la masse des différents constituants et en considérant qu'on injecte les gaz par ordre croissant de masse que doit on lire sur la balance pour la fabrication de cette mole.
d) Pour un groupe de plongeurs TEK je dois préparer un rack de 8 B50 (pression max 250 bar) de ce mélange que dois je prévoir comme gaz, que dois je lire sur ma balance ?
e) Vérifier si à la température de 40°C il n'y a pas de surpression dans les bouteilles du rack ?

Solution :
Réponse à la question a :
ce gaz Trimix contient 18% d'oxygène, 40% d'hélium et (100-18-40) 42% d'azote

$Pm_{\{Tx18/40\}}$ = (0,18x32)+(0,4x4,002)+ (0,42x28,016) = 19,129 gramme

Réponse à la question b :
Dans des conditions normales ce gaz occupe par définition un volume de 22,4135 litres

Réponse à la question c :

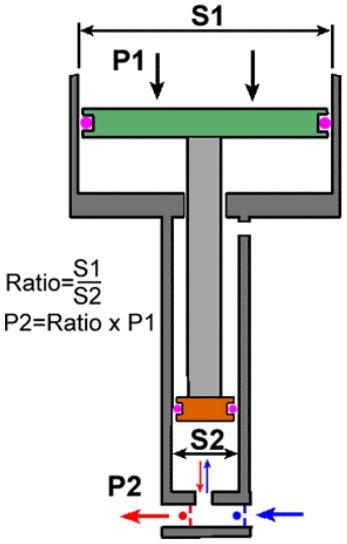
Gaz par ordre d'injection	Masse en kg	A lire sur la balance
Hélium	1,601	1,601
Azote	11,768	13,369
Oxygène	5,76	19,129

Réponse à la question d :
Considérons une pression de calcul de 200 bar dans les racks ; les B50 contiennent donc : 8x50x200/1000 = 80 m3 de gaz soit 3,569 kmole de gaz.
A l'aide d'une simple régle de trois on déduit a partir de la réponce c :

Gaz par ordre d'injection	Masse en kg	A lire sur la balance
Hélium	5,714	5,714
Azote	41,999	47,713
Oxygène	20,557	68,27

Réponse à la question e :
la pression dans le rack sera à 40°C en appliquant la loi des gaz parfaits
200x(313/273)=229 bar ce qui est tout à fait compatible pour une bouteille tampon

Remplissage à partir d'un mélange préfabriqué



On utilise des bouteilles de NITROX, TRIMIX, HELIOX, HELIAIR… préfabriqué que l'on injecte dans les bouteilles de plongée à l'aide d'un surpresseur ou "booster", l'avantage de la méthode est la simplicité, mais il n'est pas possible d'obtenir par cette méthode des mélanges différents. Le surpresseur est une machine coûteuse, il n'y a pas si longtemps ces machines étaient surtout utilisées sur les barges et les bateaux. Le nombre croissant de plongeurs "TEK", de plongeurs utilisant des recycleurs ou plus simplement des plongeurs utilisant des mélanges fortement suroxygénés à des pressions très élevées (300 bars) ont permis le développement de machines plus compactes, plus accessibles au grand public et compatibles O2. Le plus souvent les surpresseurs sont actionnés par de l'air comprimé qui par l'intermédiaire d'un système de tiroir actionne alternativement le piston. Lorsque le piston se relève le mélange venant de la bouteille nourrice remplit la chambre de compression puis le mélange est surpressé lorsque le piston redescend. Contrairement au compresseur le surpresseur n'aspire pas il faut obligatoirement que la bouteille nourrice aie une pression minimum. Certains modèles sont entraînés par un groupe hydraulique actionné par un moteur électrique. Les surpresseurs sont définis par leur ratio de compression qui varie entre 5 et 25 pour les modèles à un étage et jusqu'à 100 pour les modèles à deux étages et à double action. Haskel (http://www.haskel.com/) est sans

conteste le leader du marché, en fabriquant des machines d'une qualité exceptionnelle mais à des prix prohibitifs pour les amateurs que nous sommes. Depuis peu il y a un outsider sur le marché Jetsam Technologies Ltd. (http://www.jetsam.ca/) qui commercialise des surpresseurs particulièrement étudiés pour les plongeurs individuels. Il faut dire qu'ils ont de qui tenir puisque le concepteur n'est autre que Gordon Smith l'inventeur des recycleurs KISS.

Les mélanges ternaires

Bien que le but de cet ouvrage soit essentiellement axé sur le NITROX il me paraît inconcevable vu l'évolution des techniques de ne pas donner des éléments sur la fabrication des mélanges ternaires. Comme le nom l'indique ce sont des mélanges qui contiennent trois gaz purs ! Le NITROX et l'HELIOX étant des mélanges binaires puisqu'ils ne contiennent que deux gaz purs. Les principaux mélanges ternaires sont le TRIMIX, l'HELIAIR et l'HYDRELIOX.

Quelques définitions

HELIOX : Mélange binaire composé d'hélium et d'oxygène, ce mélange est utilisé principalement en plongée professionnelle ou en plongée sportive dans les recycleurs. Il n'est pas utilisé en circuit ouvert car il est très frigorigène et son utilisation engendre des paliers très importants.

TRIMIX :C'est le mélange ternaire le plus utilisé en plongée sportive en circuit ouvert ou fermé, il est composé d'hélium, oxygène et azote. On distingue deux types de Trimix : le Trimix hyperoxique qui contient au moins 21% d'oxygène et le Trimix hypoxique qui contient moins de 21% d'oxygène.

HELIAIR : C'est un mélange d'air et d'hélium sans apport d'oxygène, il s'agit donc d'un Trimix hypoxique.

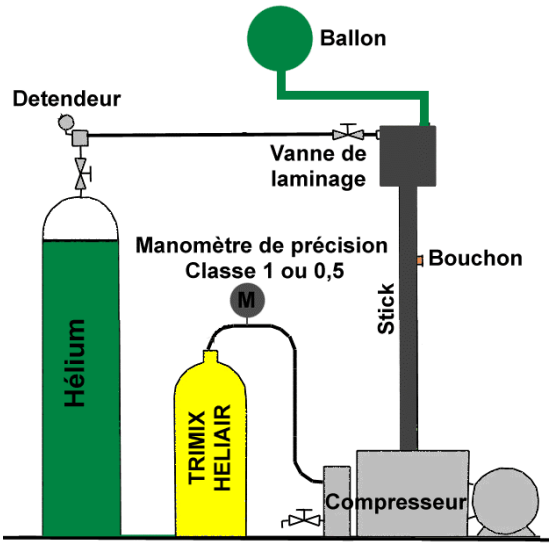
HYDRELIOX : Ce mélange est exclusivement utilisé pour des plongées pros à saturation à des profondeurs très importantes il est composé d'oxygène,d'hélium et d'hydrogène.

ARGON : Gaz neutre qui ne sert pas dans les mélanges mais qui est utilisé dans les costumes secs pour augmenter l'isothermie.

Compression des gaz

L'hélium et l'argon[18] peuvent passer sans problème dans un compresseur à pistons, l'oxygène ne peut **pas** être comprimé par un compresseur classique il faut soit le transvaser dans la bouteille à l'aide d'une lyre ou alors utiliser un booster. Pour des raisons pratiques, il est plus commode de commencer par le transvasement de l'oxygène puis par l'hélium alors qu'en théorie pour assurer une meilleure diffusion il faudrait commencer par les molécules les plus légères. Un problème de taille : la compressibilité de l'hélium, aux pressions usuelles dans les bouteilles de plongée l'hélium ne suit plus que très imparfaitement la loi des « gaz parfaits ». Une solution consiste à faire les calculs avec la relation de Van der Waals mais ces calculs sont longs, fastidieux et rébarbatifs. Une autre solution plus précise consiste à utiliser la méthode des « masses moléculaires » ce que de nombreux gonfleurs américains commencent à faire. Dans la pratique courante les calculs se font avec la loi des gaz parfaits et pour palier à la compressibilité de l'hélium on transvase une pression d'oxygène **réduite** de 10% par rapport aux calculs, quitte à ajuster cette valeur après mesure du % d'oxygène réel.

Pratique du gonflage



Le problème pour faire passer de l'hélium au travers d'un compresseur est que d'une part il faut éviter d'aspirer de l'air et d'autre part il faut assurer la continuité du gonflage sous peine d'avoir des ennuis de cavitation au niveau des cylindres (ils n'aiment pas cela du tout, mais

18 Il faut particulièrement veiller à la bonne ventilation ces gaz chauffent plus que l'air

alors pas du tout). Il faut aussi éviter de perdre de l'hélium dans l'atmosphère, bien qu'il n'y aie absolument aucun danger sauf pour votre portefeuille. Une solution consiste à placer dans le circuit d'aspiration un ballon nourrice, on peut facilement bricoler ce ballon avec une vessie de stab qui présente en plus l'avantage d'avoir une soupape de sûreté. Si le circuit d'aspiration passe au travers de votre stick il faut veiller à démonter la sonde de mesure d'02 et ne pas oublier de mettre un bouchon sur cet orifice. On peut facilement connecter l'aspiration au ballon nourrice. Le débit d'hélium étant nettement plus important que le débit d'O2 pour la fabrication du NITROX il ne faudra pas omettre d'enlever le gicleur de protection de votre stick sinon vous mettrez immanquablement votre compresseur en cavitation.

Mode opératoire

1. Mesurer le pourcentage d'hélium et d'oxygène dans le reliquat de gaz
2. Calculer les pressions à ajouter
3. Ouvrir la bouteille d'hélium
4. Gonfler le ballon en actionnant la vanne de laminage
5. Démarrer le compresseur
6. En actionnant la vanne de laminage dégonfler et gonfler le ballon deux / trois fois pour chasser l'air du circuit.
7. Connecter la bouteille sans l'ouvrir
8. Dés que le compresseur atteint 200 bars ouvrir la bouteille
9. Surveiller le manomètre de précision et le ballon qui doit rester gonflé
10. Dés que l'on atteint la pression calculée fermer la bouteille et arrêter le compresseur
11. Fermer la bouteille d'hélium et la vanne de laminage
12. Laisser reposer le mélange quelques heures, mesurer et rectifier les proportions
13. Laisser reposer 24 heures avant les mesures finales des pourcentages d' oxygène et d'hélium et avant l'utilisation.
14. En fonction des mesures finales ajuster les paramètres de la plongée

A ne jamais faire

- Laisser tourner le compresseur ballon vide
- Omettre de surveiller le manomètre
- Oublier de vérifier les pourcentages d'hélium et d'oxygène

Calcul du TRIMIX méthode des pressions partielles

Avertissement

Ces calculs sont basé sur la loi des gaz parfaits, ils sont donc comme nous l'avons démontré au chapitre précédent empreints d'un certain manque de précision.

Il est **IMPERATIF** de mesurer le % d'hélium et le % d'oxygène. Au besoin **MODIFIER** les paramètres de la plongée en fonction du mélange réel. Il faut laisser reposer les mélanges 24 heures avant les mesures finales.

Il est plus facile de faire les mélanges dans des bouteilles au préalablement vidées, les risques d'erreurs de calcul, d'imprécision sur les mesures sont limités.

Hypothèse : La bouteille de plongée contient un reliquat de mélange dont on connaît la pression P_1 et les proportions $[O_2]_1$, $[He]_1$, $[N_2]_1$ respectivement les pourcentages d'oxygène, d'hélium et d'azote dans le mélange de départ. Nous connaissons également la pression P_2 à obtenir et les proportions à obtenir soit : $[O_2]_2$, $[He]_2$, $[N_2]_2$ respectivement les pourcentages d'oxygène, d'hélium et d'azote à obtenir.

Calcul

Préliminaire

A l'aide du marquage déterminons les concentrations du mélange de départ et du mélange final. Soit le mélange de départ :

Tx $(xx)_1$ / $(yy)_1$

$$[O_2]_1 = (xx)_1 / 100 \qquad (23)$$

$$[He]_1 = (yy)_1 / 100 \qquad (23\text{-}1)$$

$$[N_2]_1 = (100-(xx)_1 - (yy)_1) / 100 \qquad (23\text{-}2)$$

Soit le mélange final à obtenir :

Tx $(xx)_2$ / $(yy)_2$

$$[O_2]_2 = (xx)_2 / 100 \qquad (23\text{-}3)$$

$$[He]_1 = (yy)_2 / 100 \qquad (23\text{-}4)$$

$$[N_2]_2 = (100-(xx)_2 - (yy)_2) / 100 \qquad (23\text{-}5)$$

a) Déterminons les pressions partielles des différents composants du mélange de départ. Soit : $\{PPO_2\}_1$, $\{PPHe\}_1$, $\{PPN_2\}_1$ respectivement les pressions partielles des différents composants du mélange de départ.

$\{PPO_2\}_1 = P_1 \times [O_2]_1$ (24)

$\{PPHe\}_1 = P_1 \times [He]_1$ (24-1)

$\{PPN_2\}_1 = P_1 \times [N_2]_1$ (24-2)

b) Déterminons les pressions partielles des différents composants du mélange que nous devons obtenir. Soit : $\{PPO2\}_2$, $\{PPHe\}_2$, $\{PPN2\}_2$ respectivement les pressions partielles des différents composants du mélange de départ.

$\{PPO_2\}_2 = P_2 \times [O_2]_2$ (25)

$\{PPHe\}_2 = P_2 \times [He]_2$ (25-1)

$\{PPN_2\}_2 = P_2 \times [N_2]_2$ (25-2)

c) Déterminons les pressions à ajouter dans la bouteille soit P_{He}, P_{O2}, P_{air} qui sont respectivement les pressions d'hélium, d'oxygène et d'air à ajouter dans la bouteille.

$P_{He} = \{PPHe\}_2 - \{PPHe\}_1$
$= (P_2 \times [He]_2) - (P_1 \times [He]_1)$

$P_{air} = (\{PPN_2\}_2 - \{PPN_2\}_1) / 0,79$

$P_{O2} = \{PPO_2\}_2 - \{PPO_2\}_1 - (P_{air} \times 0,21)$
(26) , (27), (28)

Exemple numérique # 17
Nous disposons d'une bouteille de Tx15/40 à 30 bars que nous désirons recycler en Tx12/50 à 200 bars

Préliminaires
P_1=30 bars *P_2=200 bars*
$[O_2]_1$ =15 /100=0,15
$[He]_1$ =40 /100=0,4
$[N_2]_1$ = (100 -15 - 40) /100=0,45
$[O_2]_2$ =12 /100=0,12
$[He]_2$ =50 /100= 0,5
$[N_2]_2$ = (100 -12 - 50) /100=0,38

a) Utilisation des relations (24)

$\{PPO_2\}_1$ = 30 x 0,15=4,5
$\{PPHe\}_1$ =30 x 0,4=12
$\{PPN_2\}_1$ =30 x 0,45=13,5
Vérification: 4,5 + 12 +13,5=30 bars

b) Utilisation des relations (25)

$\{PPO_2\}_2$ = 200 x 0,12=24
$\{PPHe\}_2$ =200 x 0,5=100
$\{PPN_2\}_2$ =200 x 0,38=76
Vérification: 24 + 100 +76=200 bars

c) Utilisation des relations (26), (27) et (28)

P_{He} = 100 - 12 = 88
P_{air} =(76 - 13,5) / 0,79 = 79
P_{O2} = 24 - 4,5 - (79 x 0,21) = 3
Vérification: 88 + 79 + 3 + 30 = 200 bars

Pour combattre la compressibilité de l'hélium
P_{O2} devient $(P_{O2})_{RED}$
$(P_{O2})_{RED} = P_{O2} \times 0,9 = 3x0,9=2,7$

On détermine la carte de remplissage

Ordre	Gaz	Pression	A lire sur la manomètre
	Initial	30	30
1	Oxygène	2,7	32,7
2	Hélium	88	120,7
3	Air	79	**199,7**

Le marquage des bouteilles

Le fût de la bouteille doit porter une étiquette autocollante portant au minimum la composition du mélange, la profondeur plancher d'utilisation et la pression de la bouteille. Pour les Trimix hypoxiques il convient d'ajouter sur l'étiquette la profondeur minimale autorisée. Les bouteilles de NITROX doivent aussi porter la mention « NITROX ONLY » Je pense qu'il est aussi bon d'indiquer la date de fabrication du mélange. Pour le marquage de la composition le marquage dit : « Marquage de la mer du nord » a été adopté internationalement **SAUF** en France. Le principe du marquage est simple : deux lettres désignent le type de mélange, le premier chiffre indique la concentration en oxygène et le deuxième la concentration en Hélium. On n'indique jamais la concentration en azote qui est déduite des autres chiffres. L'avantage de la méthode est

qu'il est impossible d'intervertir les chiffres contrairement au marquage français qui indique la concentration de tous les gaz. Je déconseille fortement d'utiliser la méthode française les risques d'erreur sont vraiment trop élevés, il est à espérer que dans l'avenir la fédé française change sa méthode de marquage en prenant exemple sur les TEK français formé par le TDI et l' IANTD.

Exemple de marquage mer du nord

- NITROX contenant 40% d'oxygène et par déduction 60% d'azote s'indique : **Nx40**
- NITROX contenant 30% d'oxygène et par déduction 60% d'azote s'indique : **Nx30**
- NITROX contenant 60% d'oxygène et par déduction 60% d'azote s'indique : **Nx60**
- TRIMIX contenant 20% d'oxygène, 40 d'hélium et par déduction 40% d'azote s'indique : **Tx20/40**
- TRIMIX contenant 15% d'oxygène, 50 d'hélium et par déduction 35% d'azote s'indique : **Tx15/50**

Le registre des gonflages

Obligatoire pour les gonfleurs pros, un registre peut s'avérer aussi plein d'enseignements pour les particuliers surtout si vous gonflez occasionnellement pour des copains. Ce registre peut même vous prémunir de certains risques légaux car en signant le registre le copain ou le client prend connaissance de la limite d'utilisation du mélange. Un bon registre doit contenir au minimum les notations suivantes : Date, Marquage de la bouteille, composition, profondeurs limites, pression, nom, signature, Bouteilles.

Exemple de registre

Date (heure)	Nom	Pression	Marquage	Composition		Limite mètres		Bouteilles Litres	Signature
				02	He	Max	Min		
20/1-10 hr	TOTO	195	Nx36	35,5	0	34	0	15	Vnfdkvkfd
20/1-11 hr	TUTU	205	Tx20/40	20	41	60	0	2x12	fgfbfbdfb
20/1/-12 hr	TUTU	190	Nx70	35,5	0	12	0	10	fgfbfbdfb

Chapitre 6

Analyse des mélanges

Niveau :

Spécialité Gaz Blending
Spécialité plongeur NITROX
Divemaster
Instructeur

Analyseur d'oxygène ou oxymètre

« Sans lui on ne sait pas ce que l'on respire; Sans lui on ne plonge PAS ou on plonge à l'air ou à l'oxygène. »

(Jacques Vettier- Nitrox, Trimix aux éditions Ulmer)

Ils existe deux grandes familles:

- Les oxymètres qui utilisent les propriétés paramagnétiques de L'O_2
- Les oxymètres à cellule électrochimique

Oxymètres paramagnétiques

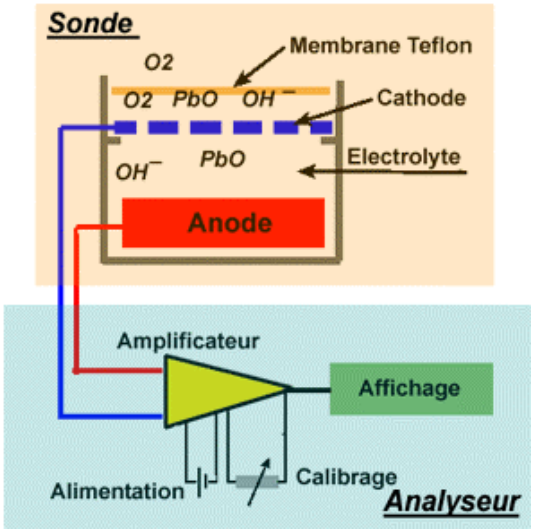
Ils utilisent les facultés que possède l'O_2 de s'aimanter dans des champs magnétiques, pour déterminer le % d'O_2. C'est oxymètres sont très précis mais très chers, de ce fait ils sont peu répandus parmi les plongeurs NITROX qui préfèrent les oxymètres à cellule électrochimique.

Oxymètres à cellule électrochimique

Le capteur d'oxygène est basé sur l'effet de pile, la différence de potentiel entre l'anode et la cathode de cette pile sera proportionnel à la quantité d'oxygène qui va traverser une paroi semi-perméable. C'est le type d'oxymètre le plus courant mais il nécessite un calibrage. L'appareil mesure en fait une pression partielle, si la pression atmosphérique n'est pas égale à 1 bar, plongée en altitude par exemple il faut utiliser une formule de correction. Les variations de température, d'humidité sont compensées par l'appareil. La plupart des cellules sont galvaniques, leur durée de vie n'est pas illimitée il est raisonnable de changer la cellule tout les 24 à 30 mois. Même sans être connectées à l'analyseur les cellules travaillent, les réactions chimiques se font et elles réduisent la durée de vie. Il ne faut donc jamais acheter directement des cellules de réserve.

Fonctionnement

L'analyseur est composé d'une sonde, et d'un circuit électronique qui analyse le signal émis par cette sonde.
Le courant produit par la sonde est la conséquence des réactions chimiques d'oxydoréduction qui ont lieu en son sein. L'oxygène s'infiltre au travers d'une membrane de Téflon pour se dissoudre dans un liquide appelé électrolyte. Au contact de la cathode (plomb ou cadmium) il se réduit (réaction de



réduction ou Redox) en produisant des électrons et simultanément l'anode s'oxyde (réaction d'oxydation ou Oxydo) en fournissant l'énergie pour la continuité de ces deux réactions (Oxydo-Redox). La différence de potentiel entre l'anode et la cathode est proportionnelle à la quantité d'électrons et donc à la quantité d'oxygène. La réaction d'oxydation mange la matière de l'anode ce qui explique que la durée de vie de la cellule est limitée, dès que la matière de cette anode devient insuffisante la cellule tombe en panne de « carburant ». La production d'électrons engendre entre l'anode et la cathode un courant électrique (entre 10 et 25 mV) que l'on peut amplifier et mesurer dans l'analyseur, un potentiomètre servant au calibrage de l'analyseur. L'alimentation de l'analyseur ne sert pas comme on le pense généralement à fournir de l'énergie à la sonde, mais sert uniquement à fournir de l'énergie au circuit électrique.

Fin de vie de la cellule

Il est très facile de s'apercevoir que la cellule approche de sa fin de vie, l'affichage devient de moins en moins stable et il faut recalibrer de plus en plus souvent l'oxymètre. Ces signes avant coureurs de la mort de la cellule sont dus au fait que la matière de l'anode est devenue insuffisante pour assurer une bonne alimentation en énergie de la cellule.

Le coin du "Petit Chimiste"

Réaction à la cathode :

$O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4OH$

Réaction à l'anode

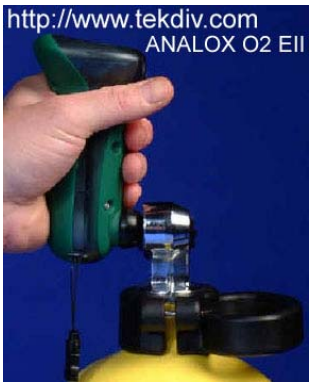
$2Pb + 4OH \rightarrow 2PbO + 2H_2O + 4e$

Réaction globale

$O_2 + 2Pb \rightarrow 2PbO$

Quel oxymètre choisir ?

Des oxymètres il y en a pour toutes les bourses, il est même possible d'acheter des kits (http://www.oxycheq.com) et (http://www.oxygenanalyzer.com) et les monter soit même. Le bon choix dépend principalement de ce que l'on attend de l'analyseur. Si on fabrique son NITROX au stick il est clair que le choix se portera plutôt vers un appareil possédant une cellule séparée avec un temps de réponse court et pouvant facilement se connecter sur le stick et sur une bouteille comme le Vandagraph (ou similaire). Si on ne fabrique pas son NITROX on peut se contenter d'un appareil portable à cellule intégrée qui à l'avantage d'être très bon marché (à peine plus cher que le prix de la cellule) mais qui est hors d'usage dès la fin de vie de la cellule et qui généralement à un temps de réponse plus élevé .



Correction en fonction de la pression atmosphérique.

$$\%O_2 = \%O_{2ind} / P_{atm} \quad (29)$$

avec:

- $\%O_2$ qui est le pourcentage réel d'oxygène,
- $\%O_{2ind}$ qui est le pourcentage d'oxygène indiqué par l'appareil
- P_{atm} qui est pression atmosphérique ambiante.

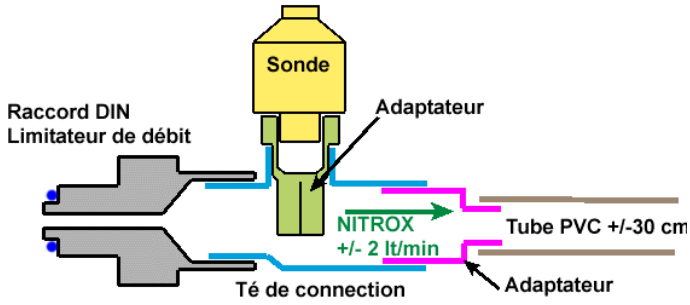
Exemples numériques #18
Question:
Mon oxymètre indique une valeur de 42 % dans un caisson à 2 bar quel est mon %O_2 ?
Solution:
%O2= 42/2= 21%

Question:
Mon oxymètre indique une valeur de 18,9 % a l'altitude de 1000m soit une Patm de 0,9 bar quel est le % d'O2 ?
Solution
%O2= 18,9/0,9= 21%

Note: certains oxymètres plus sophistiqués peuvent s'ajuster en fonction de la P_{atm} réelle.

Utilisation de l'oxymètre

1. Vérifier le calibrage de l'appareil (20.9 dans l'air), au besoin ajuster avec le bouton « Calibrate »
2. Connecter l'appareil à la bouteille à l'aide des accessoires fournis avec l'analyseur.
3. Ouvrir délicatement la bouteille de plongée.
4. Relever la valeur lorsque la mesure est stable (en moyenne 15 à 25 secondes)
5. Recommencer la mesure deux ou trois fois.



A ne JAMAIS faire :
- Oublier de vérifier le calibrage de l'oxymètre.
- Mettre la sonde sous pression.
- Ouvrir à fond le robinet de la bouteille de plongée.
- Stocker des sondes durant une longue période.
- Laisser l'appareil dans la poussière.

Analyseur d'hélium

Les analyseurs d'hélium sont des appareils relativement coûteux, quoiqu'on puisse en trouver à des prix inférieurs à 1000 $ ou 1200$ s'ils sont combinés à un oxymètre. L'avantage des appareils combinés est que l'on détermine la carte du gaz en une seule mesure. Le principe de cet appareil est assez simple, il mesure la différence de conductibilité (propriété que possède le gaz a conduire l'électricité) entre un gaz pur (hélium) et le mélange pour en déduire le pourcentage d'hélium. Une précision de mesure de l'ordre de 2% pour l'hélium est largement suffisante pour la plongée. La durée de vie de la cellule est de l'ordre de 5ans. Je pense que lorsqu'on investit dans sa propre station de fabrication TRIMIX il ne faut pas lésiner sur cet investissement, la sécurité et la santé n'ont pas de prix.

Sites :
http://www.oxycheq.com/
http://www.abyssuk.com/
http://www.teledyne-ai.com

Appendices & annexes

APP- 1 Tableaux de remplissage

- Nx36 → Nx36
- Nx32 → Nx32
- Nx36 → Nx32
- Nx32 → Nx36

APP- 2 Les relations de Van der Waals

APP- 3 Les bonnes adresses

APP- 4 Les exemples

APP- 5 Les tableaux

APP- 6 Bibliographie

ANN- 1 CD-Rom

ANN- 2 Registre gonflage

ANN- 3 Logbook compresseur

P= 200 bar $\%O_2$=36 $\%O_2$ ini=36						P= 200 bar $\%O_2$=32 $\%O_2$ ini=32					
PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano
1	37,78	38,78	51	28,29	79,29	1	27,71	28,71	51	20,75	71,75
2	37,59	39,59	52	28,10	80,10	2	27,57	29,57	52	20,61	72,61
3	37,41	40,41	53	27,91	80,91	3	27,43	30,43	53	20,47	73,47
4	37,22	41,22	54	27,72	81,72	4	27,29	31,29	54	20,33	74,33
5	37,03	42,03	55	27,53	82,53	5	27,15	32,15	55	20,19	75,19
6	36,84	42,84	56	27,34	83,34	6	27,01	33,01	56	20,05	76,05
7	36,65	43,65	57	27,15	84,15	7	26,87	33,87	57	19,91	76,91
8	36,46	44,46	58	26,96	84,96	8	26,73	34,73	58	19,77	77,77
9	36,27	45,27	59	26,77	85,77	9	26,59	35,59	59	19,63	78,63
10	36,08	46,08	60	26,58	86,58	10	26,46	36,46	60	19,49	79,49
11	35,89	46,89	61	26,39	87,39	11	26,32	37,32	61	19,35	80,35
12	35,70	47,70	62	26,20	88,20	12	26,18	38,18	62	19,22	81,22
13	35,51	48,51	63	26,01	89,01	13	26,04	39,04	63	19,08	82,08
14	35,32	49,32	64	25,82	89,82	14	25,90	39,90	64	18,94	82,94
15	35,13	50,13	65	25,63	90,63	15	25,76	40,76	65	18,80	83,80
16	34,94	50,94	66	25,44	91,44	16	25,62	41,62	66	18,66	84,66
17	34,75	51,75	67	25,25	92,25	17	25,48	42,48	67	18,52	85,52
18	34,56	52,56	68	25,06	93,06	18	25,34	43,34	68	18,38	86,38
19	34,37	53,37	69	24,87	93,87	19	25,20	44,20	69	18,24	87,24
20	34,18	54,18	70	24,68	94,68	20	25,06	45,06	70	18,10	88,10
21	33,99	54,99	71	24,49	95,49	21	24,92	45,92	71	17,96	88,96
22	33,80	55,80	72	24,30	96,30	22	24,78	46,78	72	17,82	89,82
23	33,61	56,61	73	24,11	97,11	23	24,65	47,65	73	17,68	90,68
24	33,42	57,42	74	23,92	97,92	24	24,51	48,51	74	17,54	91,54
25	33,23	58,23	75	23,73	98,73	25	24,37	49,37	75	17,41	92,41
26	33,04	59,04	76	23,54	99,54	26	24,23	50,23	76	17,27	93,27
27	32,85	59,85	77	23,35	100,35	27	24,09	51,09	77	17,13	94,13
28	32,66	60,66	78	23,16	101,16	28	23,95	51,95	78	16,99	94,99
29	32,47	61,47	79	22,97	101,97	29	23,81	52,81	79	16,85	95,85
30	32,28	62,28	80	22,78	102,78	30	23,67	53,67	80	16,71	96,71
31	32,09	63,09	81	22,59	103,59	31	23,53	54,53	81	16,57	97,57
32	31,90	63,90	82	22,41	104,41	32	23,39	55,39	82	16,43	98,43
33	31,71	64,71	83	22,22	105,22	33	23,25	56,25	83	16,29	99,29
34	31,52	65,52	84	22,03	106,03	34	23,11	57,11	84	16,15	100,15
35	31,33	66,33	85	21,84	106,84	35	22,97	57,97	85	16,01	101,01
36	31,14	67,14	86	21,65	107,65	36	22,84	58,84	86	15,87	101,87
37	30,95	67,95	87	21,46	108,46	37	22,70	59,70	87	15,73	102,73
38	30,76	68,76	88	21,27	109,27	38	22,56	60,56	88	15,59	103,59
39	30,57	69,57	89	21,08	110,08	39	22,42	61,42	89	15,46	104,46
40	30,38	70,38	90	20,89	110,89	40	22,28	62,28	90	15,32	105,32
41	30,19	71,19	91	20,70	111,70	41	22,14	63,14	91	15,18	106,18
42	30,00	72,00	92	20,51	112,51	42	22,00	64,00	92	15,04	107,04
43	29,81	72,81	93	20,32	113,32	43	21,86	64,86	93	14,90	107,90
44	29,62	73,62	94	20,13	114,13	44	21,72	65,72	94	14,76	108,76
45	29,43	74,43	95	19,94	114,94	45	21,58	66,58	95	14,62	109,62
46	29,24	75,24	96	19,75	115,75	46	21,44	67,44	96	14,48	110,48
47	29,05	76,05	97	19,56	116,56	47	21,30	68,30	97	14,34	111,34
48	28,86	76,86	98	19,37	117,37	48	21,16	69,16	98	14,20	112,20
49	28,67	77,67	99	19,18	118,18	49	21,03	70,03	99	14,06	113,06
50	28,48	78,48	100	18,99	118,99	50	20,89	70,89	100	13,92	113,92

P= 200 bar $\%O_2$=36 $\%O_2$ ini=32						P= 200 bar $\%O_2$=32 $\%O_2$ ini=36					
PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano	PB	Ajout 02	Pmano
1	37,84	38,84	51	30,87	81,87	1	27,66	28,66	51	18,16	69,16
2	37,70	39,70	52	30,73	82,73	2	27,47	29,47	52	17,97	69,97
3	37,56	40,56	53	30,59	83,59	3	27,28	30,28	53	17,78	70,78
4	37,42	41,42	54	30,46	84,46	4	27,09	31,09	54	17,59	71,59
5	37,28	42,28	55	30,32	85,32	5	26,90	31,90	55	17,41	72,41
6	37,14	43,14	56	30,18	86,18	6	26,71	32,71	56	17,22	73,22
7	37,00	44,00	57	30,04	87,04	7	26,52	33,52	57	17,03	74,03
8	36,86	44,86	58	29,90	87,90	8	26,33	34,33	58	16,84	74,84
9	36,72	45,72	59	29,76	88,76	9	26,14	35,14	59	16,65	75,65
10	36,58	46,58	60	29,62	89,62	10	25,95	35,95	60	16,46	76,46
11	36,44	47,44	61	29,48	90,48	11	25,76	36,76	61	16,27	77,27
12	36,30	48,30	62	29,34	91,34	12	25,57	37,57	62	16,08	78,08
13	36,16	49,16	63	29,20	92,20	13	25,38	38,38	63	15,89	78,89
14	36,03	50,03	64	29,06	93,06	14	25,19	39,19	64	15,70	79,70
15	35,89	50,89	65	28,92	93,92	15	25,00	40,00	65	15,51	80,51
16	35,75	51,75	66	28,78	94,78	16	24,81	40,81	66	15,32	81,32
17	35,61	52,61	67	28,65	95,65	17	24,62	41,62	67	15,13	82,13
18	35,47	53,47	68	28,51	96,51	18	24,43	42,43	68	14,94	82,94
19	35,33	54,33	69	28,37	97,37	19	24,24	43,24	69	14,75	83,75
20	35,19	55,19	70	28,23	98,23	20	24,05	44,05	70	14,56	84,56
21	35,05	56,05	71	28,09	99,09	21	23,86	44,86	71	14,37	85,37
22	34,91	56,91	72	27,95	99,95	22	23,67	45,67	72	14,18	86,18
23	34,77	57,77	73	27,81	100,81	23	23,48	46,48	73	13,99	86,99
24	34,63	58,63	74	27,67	101,67	24	23,29	47,29	74	13,80	87,80
25	34,49	59,49	75	27,53	102,53	25	23,10	48,10	75	13,61	88,61
26	34,35	60,35	76	27,39	103,39	26	22,91	48,91	76	13,42	89,42
27	34,22	61,22	77	27,25	104,25	27	22,72	49,72	77	13,23	90,23
28	34,08	62,08	78	27,11	105,11	28	22,53	50,53	78	13,04	91,04
29	33,94	62,94	79	26,97	105,97	29	22,34	51,34	79	12,85	91,85
30	33,80	63,80	80	26,84	106,84	30	22,15	52,15	80	12,66	92,66
31	33,66	64,66	81	26,70	107,70	31	21,96	52,96	81	12,47	93,47
32	33,52	65,52	82	26,56	108,56	32	21,77	53,77	82	12,28	94,28
33	33,38	66,38	83	26,42	109,42	33	21,58	54,58	83	12,09	95,09
34	33,24	67,24	84	26,28	110,28	34	21,39	55,39	84	11,90	95,90
35	33,10	68,10	85	26,14	111,14	35	21,20	56,20	85	11,71	96,71
36	32,96	68,96	86	26,00	112,00	36	21,01	57,01	86	11,52	97,52
37	32,82	69,82	87	25,86	112,86	37	20,82	57,82	87	11,33	98,33
38	32,68	70,68	88	25,72	113,72	38	20,63	58,63	88	11,14	99,14
39	32,54	71,54	89	25,58	114,58	39	20,44	59,44	89	10,95	99,95
40	32,41	72,41	90	25,44	115,44	40	20,25	60,25	90	10,76	100,76
41	32,27	73,27	91	25,30	116,30	41	20,06	61,06	91	10,57	101,57
42	32,13	74,13	92	25,16	117,16	42	19,87	61,87	92	10,38	102,38
43	31,99	74,99	93	25,03	118,03	43	19,68	62,68	93	10,19	103,19
44	31,85	75,85	94	24,89	118,89	44	19,49	63,49	94	10,00	104,00
45	31,71	76,71	95	24,75	119,75	45	19,30	64,30	95	9,81	104,81
46	31,57	77,57	96	24,61	120,61	46	19,11	65,11	96	9,62	105,62
47	31,43	78,43	97	24,47	121,47	47	18,92	65,92	97	9,43	106,43
48	31,29	79,29	98	24,33	122,33	48	18,73	66,73	98	9,24	107,24
49	31,15	80,15	99	24,19	123,19	49	18,54	67,54	99	9,05	108,05
50	31,01	81,01	100	24,05	124,05	50	18,35	68,35	100	8,86	108,86

Les relations de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a n^2}{V^2}\right)(V - n b) = n R T$$

Pour une transformation isotherme entre l'état 1 et 2 l'équation de VdW devient :

$$\left(P_1 + \frac{a n^2}{V_1^2}\right)(V_1 - n b) = \left(P_2 + \frac{a n^2}{V_2^2}\right)(V_2 - n b)$$

En isolant P_2 qui est notre inconnue :

$$P_2 = \frac{\left(P_1 + \frac{a n^2}{V_1^2}\right)(V_1 - n b)}{(V_2 - n b)} - \left(\frac{a n^2}{V_2^2}\right)$$

- P_1= Pression en atm avant la transformation
- P_2= Pression en atm aprés la transformation
- V_1= Volume du gaz avant la transformation
- V_2= Volume du gaz aprés la transformation
- a et b constantes de VdW
- R = Constante des gaz parfaits
- n = Nombre de mole de gaz
- *A la pression atmosphérique et à 0°C une mole occupe un espace de 22.415 litres.*
- T= Températures absolue en Kelvin

Les constantes a et b de Van der Waals

Gaz	a ($atm.L^2/mole^2$)	b (L/mole)
He	0,034	0,03412
O_2	1,36	0,03183
N_2	1,39	0,03913

L'équation de Van der Waals introduit les corrections suivantes dans la loi des gaz parfaits. Les molécules ne sont plus considérées comme étant incompressibles et leur volume n'est plus considéré comme nul. Cette loi tient compte des forces d'attraction intramoléculaire et de la taille des différentes molécules.

Johannes Diderik Van der Waals (1837-1923)
Physicien hollandais, lauréat du prix Nobel, dont le nom est attaché aux forces intermoléculaires. D'abord instituteur, il poursuivit ses études à Leyde et enseigna à l'université d'Amsterdam de 1877 à 1907. En thermodynamique, il modifia par une voie théorique l'équation d'état des gaz parfaits pour mieux l'accorder aux propriétés des gaz réels.. Une de ses hypothèses était que les molécules s'attirent mutuellement. Il reçut, en 1910, le prix Nobel de physique pour ses découvertes.

Les bonnes adresses

Compresseur

Coltri	http://www.coltrisub.it/	Fixes, mobiles, petits et gros débits, "Silent" et "Hyper Silent",NITROX
Bauer	http://www.bauer-kompressoren.de/	Fixes, mobiles, petits et gros débits, "Silent" et "Hyper Silent"
Komptec	http://www.komptec.de/	Fixes, mobiles, petits et moyens débits
Compair	http://www.compair.fr/	Fixes, gros débits, "Silent"
APM Peluffo	http://www.apmpeluffo.com	Compresseurs L&W ,fixes, mobiles, "Silent"

Booster

Haskel	http://www.haskel.com/	Petits et grands débits, Ratio important
Jetsam Technologies	http://www.jetsam.ca/	Petits débits ratio moyen
Maxpro Technologies	http://www.maxprotech.com/	Petits et grands débits, Ratio important

Stick

Ing. Bernard Murisier	http://isuisse.ifrance.com/plongee-speleo/	Fabriquant
Envirodive	http://www.envirodive.com/	Vendeur
LlewocSIS Nitrox Stik	http://www.nauitec.com/llewocsis.html	Fabriquant

DNAx et séparateurs à membranes

Undersea Breathing Systems	http://www.dnax.com	Fabriquant
Coltri	http://www.coltrisub.it/	Installations compactes
Komptec	http://www.komptec.de/	Menox 2000 fitration sur membranes

Matériel compatible O2

Oxycheq	http://www.oxycheq.com	Lyres, sondes, ordinateurs, piping, matériel TEK en général
Bigata	http://www.bigata.fr	Lyres, piping, produits d'entretien, surfiltres
Under Water Equipements	http://underwater-equipements	Lyres, sondes, ordinateurs, piping, matériel TEK en général
Subaqua Products	http://www.subaqua-products.co.uk	Lyres, sondes, piping, analyseurs, panneaux , surfiltres
Komptec	http://www.komptec.de/	Lyres, surfiltres

Analyseur O2 et He

Vandagraph	http://www.vandagraph.co.uk/	Analyseur O2
RC Dive Technology	http://www.oxygenanalyzer.com	Analyseur O2 +kit
Anolox Sensor Technology	http://www.analox.net	Analyseur O2 et He, mini Analyseur
Oxycheq	http://www.oxycheq.com	Analyseur O2 et He, mini Analyseur
Teledyne	http://www.teledyne-ai.com/	Analyseur O2 et He
Abyss	http://www.abyssuk.com	Analyseur O2 et He
Under Water Equipements	http://underwater-equipements	Analyseur O2 et He, mini Analyseur
Subaqua Products	http://www.subaqua-products.co.uk	Analyseur O2
Komptec	http://www.komptec.de/	Mini Analyseur O2
VTI	http://www.vti-online.com	Analyseur O2
Atomox	http://www.atomox.com/	Analyseur O2 et He

Huiles, charbon actif, tamis moléculaire...

Bigata	http://www.bigata.fr	Huiles, Silicagel, Charbon , Tamis, feutrines
Under Water Equipements	http://underwater-equipements	Huiles, Silicagel, Charbon , Tamis , feutrines

Fournisseur de gaz

Messer	http://www.messer.be/	Belgique
Ijsfabriek van Strombeek	http://www.ysfab.be/	Belgique
L'air Liquide-France	http://www.airliquide.com/	France
L'air Liquide-Belgique	http://www.airliquide.be	Belgique
Air Products	http://www.airproducts.be	Belgique

Les exemples

Exemple #1:	Application de la loi de Dalton	5
Exemple #2:	Application de la loi de Dalton	5
Exemple #3:	Calcul de la profondeur equivalentente (ead)	6
Exemple #4:	Calcul elementaire du %CNS	7
Exemple #5:	Calcul du %CNS	7
Exemple #6:	Calcul detaillè du %CNS	8
Exemple #7:	Calcul de la diminution du %CNS	9
Exemple #8:	Calcul de la diminution du %CNS	9
Exemple #9:	Calcul de la diminution du %CNS	9
Exemple #10:	Calcul de la diminution du %CNS	9
Exemple #11:	Calcul de l OTU	10
Exemple #12:	Calcul de l OTU	10
Exemple #13:	Calcul de la reduction de la capacité vitale	10
Exemple #14:	Planification d' une plongée	12
Exemple #15:	Calcul de fabrication d'un NITROX	31
Exemple #16:	Calcul de fabrication d'un TRIMIX par masse moléculaire	36
Exemple #17:	Calcul de fabrication d'un TRIMIX par pressions partielles	39
Exemple #18 :	Calcul de la correction des oxymètres	43

Les tableaux

Tableau #1:	Seuil toxique de l'oxygène	6
Tableau #2:	Temps d'exposition à l'oxygène(NOAA)	7
Tableau #3:	Détermination du %CNS suivant un tableau pré établi	8
Tableau #4:	Réduction du %CNS en fonction de l'intervalle de surface	8
Tableau #5:	Intervalle de temps pour une réduction du CNS pré-établie	9
Tableau #6:	Coefficient Kp	10
Tableau #7:	Matériaux non compatible O2	17
Tableau #8:	Matériaux compatible O2	17
Tableau #9:	Dégraissants usuels	18
Tableau #10:	Les abrasifs usuels	18
Tableau #11:	Utilisation des détergents	18
Tableau #12:	Table de décision pour le tonnelage	19
Tableau #13:	Composition de l'air	20
Tableau #14:	Niveaux sonores des compresseurs	25
Tableau #15:	Entretien des compresseurs	28
Tableau #16:	Coût des compresseurs	28
Tableau #17:	Ammortissement des compresseurs	28

Bibliographie.

Jacques Vettier -- *Nitrox Trimix* , ed Ulmer 2003
André Houberechts -- *La Thermodynamique Technique*, ed Vander 1975
Woods -- *Guide Pratique de la Ventilation*, ed Dunod
J-P Bonnin, C Grimaud, J-C Happey, J-M Strub, P. Cart -- *La plongée sous-marine sportive,* Masson 1999
D Sirven -- *La plongée NITROX*, Technical Diving International France, 1996
D Rutkowski -- *NITROX Manual*, Hyberbaric International, Key Largo, FL. 1989
L Somers -- *Enriched air NITROX diver instructor's manual*, IANTD, Miami, FL. 1992
US Navy Diving Manual
DNAx Denitogenated Air, Advanced Diver, 3, 1999, 49-50

Manuel d'utilisation des compresseurs Coltri
Manuel d'utilisation des compresseurs Bauer
Documents publicitaires Coltri
Documents publicitaires Bauer
Norme CEE EN12021
Catalogue Bigata
Catalogue Undersea Breathing Systems

Sites internet
http://www.plongeesout.com/
http://www.dnax.com/
http://www.oxycheq.com
http://www.oxygenanalyzer.com
http://www.vandagraph.co.uk/